

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS
MATERIAIS

CAMILO BORGES NETO

DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS DE RESINA EPÓXI E FIBRAS DE
TAQUARA-LIXA (*MEROSTACHYS SKVORTZOVII* SENDULSKY),
PARA APLICAÇÕES ESTRUTURAIS

Curitiba/PR

2014

CAMILO BORGES NETO

DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS DE RESINA EPÓXI E FIBRAS DE
TAQUARA-LIXA (*MEROSTACHYS SKVORTZOVII* SENDULSKY),
PARA APLICAÇÕES ESTRUTURAIS

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, no Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná para obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Orientadora: Professora Thais Helena Sydenstricker Flores-Sahagun.

Curitiba/PR

2014

B732

Borges Neto, Camilo

Desenvolvimento de compósitos de resina epóxi e fibras de taquara-lixia (*Merostachys skvortzovii* Sendulsky), para aplicações estruturais / Camilo Borges Neto. – Curitiba, 2014.

214 f.: il. color.; 30 cm.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais, no Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná para obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciências dos Materiais.

Orientadora: Prof. Dra. Thais Helena Sydenstricker Flores-Sahagun

Bibliografia: p. 177-184.

1. Engenharia de materiais. 2 Polimeros. I. Flores-Sahagun, Thais Helena Sydenstricker. III. Universidade Federal do Paraná. IV. Título.

CDD: 620.192

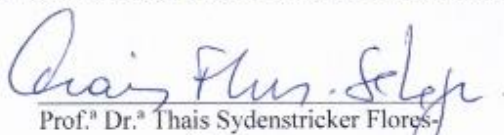


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais
Setor de Tecnologia

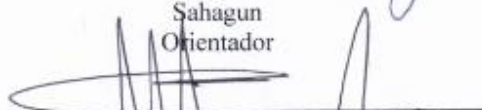
RELATÓRIO DE DEFESA DE TESE DE DOUTORADO


Aos trinta e um dias do mês de outubro de 2014, Sala de Aula do PG-MEC 02 - no Centro Politécnico - UFPR, foi instalada pela Prof.^a Dr.^a Ana Sofia C. M. de Oliveira, coordenadora do PIPE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, a Banca Examinadora para a sexagésima terceira defesa de tese de doutorado na área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais. Estiveram presentes no ato, professores, alunos e visitantes. A Banca Examinadora, atendendo a determinação do colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, foi constituída pelos professores doutores: Thais Sydenstricker Flores-Sahagun (UFPR), Carlos Itsuo Yamamoto, (UFPR), Ramon S. C. Paredes (UFPR), Vsevolod Mymrine (UTFPR), Luiz Claudio de Santa Maria (UERJ). Às 09:00 horas, a banca iniciou os trabalhos, convidando o candidato **CAMILO BORGES NETO** a fazer a apresentação da tese de doutorado intitulada **“DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS DE RESINA EPÓXI E FIBRAS DE TAQUARA-LIXA (*MEROSTACHYS SKVORTZOVII* SENDULSKY) PARA APLICAÇÕES ESTRUTURAIS.”** Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de arguição pelos membros participantes. Tendo em vista a tese e a arguição, a banca decidiu pela aprovação do candidato, (de acordo com a determinação dos artigos 68 e 69 da resolução 65/09 de 09.11.2009).


Curitiba, 31 de outubro de 2014.

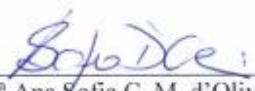

Prof.^a Dr.^a Thais Sydenstricker Flores-
Sahagun
Orientador


Prof. Dr. Carlos Itsuo Yamamoto
Examinador


Prof. Dr. Ramon S. C. Paredes
Examinador


Prof. Dr. Vsevolod Mymrine
Examinador


Prof. Dr. Luiz Claudio de Santa Maria
Examinador


Prof.^a Dr.^a Ana Sofia C. M. d'Oliveira
Coordenadora do PIPE

AGRADECIMENTOS

Registramos nosso reconhecimento sincero a todos os que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e muito especialmente:

- Ao Prof. Dr. Ricardo Pedro Bom cujos firme apoio inicial e entusiasmado envolvimento foram fundamentais ao estabelecimento dos eixos principais deste trabalho;
- À UDESC – Universidade Estadual de Santa Catarina, *Campus* de Joinville, na pessoa do Prof. Masahiro, Coordenador do Laboratório de Engenharia Mecânica, que nos cedeu os equipamentos de laboratório e de informática, para a parte inicial do trabalho;
- Aos Institutos LACTEC, na pessoa do Prof. Dr. Ney Augusto Nascimento que nos cederam os equipamentos e os auxiliares técnicos dos Laboratórios de Materiais e Estruturas – LAME e de Análises Físicas, tornando possível a realização dos procedimentos experimentais desta pesquisa;
- À Prof. Thais Helena Sydenstricker Flores-Sahagun, Orientadora deste Trabalho de Doutorado, que com seu apoio, estímulo, experiência, colaboração e amizade, firmes e irrestritos, garantiu sua realização;
- Ao Prof. Dr. Alan Sulato de Andrade, do Curso de Engenharia Industrial Madeireira e ao Prof. Dr. Irineu Mazzaro, do Curso de Física, da Universidade Federal do Paraná, pela inestimável colaboração na fase de análises de Composição Química e de determinação dos Índices de Cristalinidade das fibras vegetais pesquisadas, que muito valorizaram este trabalho;
- Ao pessoal técnico do LAME/LACTEC, na pessoa do Sr. Jeferson Bronholo, Tecnólogo Responsável, pelo apoio correto e entusiasmado durante a execução dos Ensaio de Flexão de Três Pontos, da Segunda Parte deste trabalho;
- Aos colegas de Laboratório de Polímeros da UDESC/Joinville, Carlos A. Alves Jr., Elton Garcia dos Reis e Dario Augusto Fredianelli, alunos da Universidade do Estado de Santa Catarina, pelo auxílio e apoio desinteressados, com os quais nos distinguiram durante a Primeira Parte Experimental do Trabalho.

*“Para quem viaja ao encontro do sol
é sempre madrugada.”*

Helena Kolody

*“...Viva a mocidade
que tem sol no coração!”*

Marita França

RESUMO

Nesta tese de doutorado, a caracterização de fibras não tratadas e tratadas com álcali, de uma espécie vulgar de bambu, a taquara-lixá (*Merostachys skvortzovii* Sendulsky) foi efetuada através da determinação de sua composição química (umidade, cinzas, lignina e conteúdo de extrativos) solubilidade em água quente e fria, pH, microscopia óptica e índice de cristalinidade. Uma análise térmica mostrou que as fibras começam o processo de degradação aos 250°C. Corpos de prova de compósitos de taquara-lixá/resina epóxi foram preparados com 56% (m/m) de fibras longas (280 mm) alinhadas e com 54% (m/m) de fibras curtas (25 mm) dispostas aleatoriamente e um corpo de prova em forma de viga-sanduiche em três camadas foi moldado, com duas camadas externas de compósitos de fibras longas, separadas por uma camada mais espessa de compósito de fibras curtas. Análises foram feitas por dois métodos (Timoshenko e ASTM) para a obtenção de parâmetros de caracterização mecânica dos materiais (Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento) e os valores obtidos foram aplicados em ensaio simulado de um corpo de prova em forma de viga-sanduiche, sendo seus resultados comparados com ensaios experimentais. Os compósitos foram caracterizados por difratometria de raios-X, absorção de água e umidade, e ensaios de flexão. Os módulos de elasticidade e de cisalhamento dos compósitos (15 500 MPa e 932 MPa / 6 800 MPa e 1 042 MPa, para compósitos de fibras longas e curtas, respectivamente) indicam que estes materiais podem ser utilizados em aplicações estruturais, com a vantagem de apresentar baixas taxas de absorção de água (8,4%) e umidade (2,4-2,8%). Concluiu-se que o método aqui chamado de Timoshenko é o mais conveniente para servir como ferramenta de obtenção dos Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento de compósitos sintéticos. O trabalho foi complementado com a aplicação do método proposto em ensaios de flexão de uma nova série e de corpos de prova de compósitos de taquara-lixá/epóxi e foi concluído que estes materiais podem ser utilizados em aplicações estruturais (vigas-sanduiche) mesmo sem tratamento químico das fibras.

Palavras-chave: Fibras de taquara-lixá. Tratamento mecânico. Compósitos. Ensaio de flexão. Vigas-sanduiche.

ABSTRACT

In this doctorate thesis, characterization of untreated or alkali treated fibers of “taquara-lixá” (*Merostachys skvortzovii* Sendulsky), a common type of bamboo, was performed through the determination of the chemical composition (moisture, ash, lignin and extractive contents), solubility in hot or cold water, pH values, optical microscopy and crystallinity index. Thermal analysis showed that fibers begin to degrade at 250°C. Samples of taquara-lixá/epoxy resin composites were prepared with 56% (w/w) of long aligned fibers (280mm) and with 54% (w/w) of randomly disposed short fibers (25mm) and a sandwich-beam sample shaped in three layers was prepared with two outer long fibers composite separated by a thicker layer of the short fiber material. Analysis was performed by two methods (Timoshenko and ASTM), to obtain mechanical characterizing parameters of the materials (elastic and shear modules) and the values obtained were applied in a simulated testing of a specimen shaped as a sandwich-beam, and this results were compared with experimental ones. Composites were characterized by x-ray diffraction patterns, water and moisture absorption, and flexural tests. Elasticity and shear modulus of composites (15 500 MPa and 932 MPa/ 6 800 MPa and 1 042 MPa for long and short fibers composites respectively) indicate that these materials may be used for structural applications with the advantage of low water (8.4%) and moisture (2.4-2.8%) absorption. It was concluded that the method here named Timoshenko is the more convenient to serve as a tool in obtaining Elasticity and Shear Modules of synthetic composites. The work was completed by applying the proposed method in bending tests of new series of epoxy/taquara-lixá composites specimens and it was concluded that these materials can be used in structural applications (sandwich beams) even without chemical treatment of the fibers.

Keywords: Taquara-lixá fibers. Mechanical treatment. Composites. Bending tests. Sandwich beams.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Aspecto de um bambuzal	35
Figura 2	Ilustração dos tipos de Rizoma (Fonte: Lopez, 2003)	36
Figura 3	Anatomia de um colmo de bambu (Fonte: Pereira, 2001)	36
Figura 4	Taquara-lixá (<i>Merostachys skvortzovii</i> Sendulsky)	39
Figura 5	Esquema representativo das deformações de um corpo submetido a um esforço de tração	47
Figura 6	Esquema de corpo de prova submetido a esforço cisalhante	50
Figura 7	Definição de eixos para descrição da Anisotropia Mecânica	52
Figura 8	Esquema Ilustrativo de Cisalhamento Fibra-Matriz	55
Figura 9	Desenho alegórico representando o funcionamento de um viga-sanduiche	59
Figura 10	Esquema de uma viga-sanduiche e convenção de sinais	60
Figura 11	Taquara-lixá “ <i>in natura</i> ”	66
Figura 12	Calandra desenvolvida na UDESC /Joinville	67
Figura 13	Molde de aço para blocos de compósitos, desenvolvido na UDESC/Joinville	67
Figura 14	Máquina Universal EMIC DL30000, da UDESC/Joinville e detalhe do posicionamento dos apoios e célula de carga	68
Figura 15	Deflectômetro acoplado à Máquina Universal de ensaios e seu posicionamento	69
Figura 16	Ilustração de Aplicação do Método de Segal <i>et al.</i> (1959)	72
Figura 17	Amostra Geral.....	73
Figura 18	Amostra detalhada da taquara-lixá.....	74
Figura 19	Material inorgânico – entrada.....	75
Figura 20	Material inorgânico dentro da mufla.....	76
Figura 21	pHmetro: determinação do pH da taquara-lixá.....	78
Figura 22	Extração primeira fase: etanol-tolueno.....	79
Figura 23	Extração segunda fase: etanol.....	79
Figura 24	Filtragem da lignina.....	80
Figura 25	Lignina obtida por meio de filtração.....	80

Figura 26	Micrografias de fibras de taquara-lixas.....	81
Figura 27	Curva de TGA de uma amostra de taquara-lixas	82
Figura 28	Difratograma de Raio-X de amostra de taquara-lixas	83
Figura 29	Sobreposição de difratogramas de taquara-lixas tratada e não-tratada.....	84
Figura 30	Difratogramas sobrepostos das amostras em direções longitudinal e transversal	85
Figura 31	Figuras (a, b, c, d, e) – Sequência de difratogramas, para taquara-lixas não-tratada, tratada com NaOH, fibra longa, fibra curta e matriz	86
Figura 32	Ensaio de FTIR de amostra de taquara-lixas	87
Figura 33	Máquina Universal EMIC DL30000 e posicionamento do deflectômetro (UDESC/Joinville)	93
Figura 34	Representação esquemática do Ensaio de Flexão de Três Pontos e Seção Reta da amostra ensaiada	94
Figura 35	Gráfico para ensaio do CP1, Fibras Longas – Posição A	95
Figura 36	Preparo das fibras - Corte dos entrenós	96
Figura 37	Calandra desenvolvida para processamento das fibras vegetais	96
Figura 38	Amostras de fibras sem tratamento químico, após a primeira passagem na calandra, após a segunda passagem e após a secagem	98
Figura 39	Compressão durante a moldagem dos blocos de compósitos ...	99
Figura 40	Imagem de corpos de prova antes de serem ensaiados	100
Figura 41	Retas obtidas por interpolação da Equação 42, relativas aos CP de Fibras Longas, nas Posições A e B	106
Figura 42	Retas obtidas por interpolação da Equação 42, relativas aos CP de Fibras Curtas, nas Posições A e B	107
Figura 43	Reprodução de um Corpo de Prova para simulação numérica	116
Figura 44	Exemplo de resultado de deformações, obtido em simulação numérica de Ensaio de Flexão de Três Pontos.....	117
Figura 45	Módulos de Elasticidade e Cisalhamento vs. Distância entre Apoios, CP1, Posições A e B.....	119

Figura 46	Módulos de Elasticidade e Cisalhamento vs. Distância entre Apoios, CP7, Posições A e B	119
Figura 47	Módulos de Elasticidade e Cisalhamento vs. Razão h/L, CP1, Posições A e B.....	120
Figura 48	Módulos de Elasticidade e Cisalhamento vs. Razão h/L, CP7, Posições A e B.....	121
Figura 49	Diferenças entre Flechas experimental e Simulada vs. Razão h/L, CP1, Posições A e B	122
Figura 50	Diferenças entre Flechas experimental e Simulada vs. Razão h/L, CP1, Posições A e B	122
Figura 51	Colocação da primeira camada de fibras longas (face inferior) .	127
Figura 52	Colocação da segunda camada. Fibras curtas e aleatórias (núcleo)	128
Figura 53	Colocação de resina epóxi sobre a última camada de fibras longas alinhadas (face superior)	128
Figura 54	Gráfico para Ensaio de Flexão de Viga-Sanduíche	129
Figura 55	Imagem ilustrativa de uma seção de corpo de prova, em forma de viga-sanduíche, onde se identificam as faces e o núcleo de materiais compósitos de Matriz Epóxi reforçados com Fibras de Taquara-lixas.....	130
Figura 56	Exemplo de resultado de simulação de uma Viga-Sanduíche.....	132
Figura 57	Gráfico comparativo D vs. t	134
Figura 58	Prensa hidráulica com aquecimento. Lab. Polímeros do DEMEC da UFPR.....	139
Figura 59	Máquina Universal de Ensaios EMIC DL10000, do LAME (LACTEC/UFPR)	140
Figura 60	Deflectômetro Eletrônico EMIC EE05, do LAME (LACTEC/UFPR)	140
Figura 61	Compressão de moldagem do Bloco 1.....	142
Figura 62	Corpos de prova de fibras longas, 5 tf.....	142
Figura 63	Aspecto do Bloco 2, após a moldagem.....	143
Figura 64	Corpos de prova de fibras longas, 7 tf.....	144

Figura 65	Preparo de operação de colocação das fibras no molde.....	144
Figura 66	Colocação das fibras transversais, no molde.....	145
Figura 67	Aspecto do Bloco 3, após a retirada do molde.....	146
Figura 68	Corpos de prova de fibras transversais.....	146
Figura 69	Colocação das fibras dispersas de 25 mm, no Bloco 4.....	147
Figura 70	Aspecto do Bloco 4, após a moldagem.....	148
Figura 71	Corpos de prova de fibras curtas, aleatórias.....	148
Figura 72	Conjunto dos corpos de prova preparados.....	150
Figura 73	Máquina Universal EMIC DL10000 e posicionamento do deflectômetro (LAME/LACTEC)	151
Figura 74	Curvas obtidas do ensaio do BL1 CP1, Fibras Longas – Posição A	152

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Valores mínimos de propriedades das madeiras e dos produtos de madeira para dormentes (madeira serrada, madeira laminada colada (MCL), “ <i>parallel strand lumber</i> ” (PSL) e laminado colado (LVL).	43
Tabela 2	Valores indicativos de Módulo de Poisson	49
Tabela 3	Índice de cristalinidade de várias fibras vegetais	84
Tabela 4	Composição química e características da taquara-lixo tratada ou não tratada com NaOH.....	89
Tabela 5	Composição química de diversas fibras vegetais.....	91
Tabela 6	Dimensões dos corpos de prova	100
Tabela 7	Módulos de Elasticidade Aparente, para CP de Fibras Longas, na Posição A	103
Tabela 8	Módulos de Elasticidade Aparente, para CP de Fibras Longas, na Posição B	104
Tabela 9	Módulos de Elasticidade Aparente, para CP de Fibras Curtas, na Posição A	105
Tabela 10	Módulos de Elasticidade Aparente, para CP de Fibras Curtas, na Posição B	105
Tabela 11	Módulos de Elasticidade e Módulos de Cisalhamento, para Corpos de Prova com Fibras Longas, nas Posições A e B	107
Tabela 12	Módulos de Elasticidade e Módulos de Cisalhamento, para Corpos de Prova com Fibras Curtas, nas Posições A e B	108
Tabela 13	Módulos de Elasticidade obtidos em materiais semelhantes, por outros autores	109
Tabela 14	Percentagens de crescimento de E_{ap} , com o aumento de L , CP de Fibras Longas	111
Tabela 15	Percentagens de crescimento de E_{ap} , com o aumento de L , CP de Fibras Curtas	112
Tabela 16	Valores de E e G , para o CP1, Fibras Longas, Posições A e B .	115
Tabela 17	Valores de E e G , para o CP7, Fibras Curtas, Posições A e B ..	115

Tabela 18	Comparação entre Flechas Experimental e Simulada, CP1, Fibras Longas, Posições A e B	117
Tabela 19	Comparação entre Flechas Experimental e Simulada, CP7, Fibras Curtas, Posições A e B	118
Tabela 20	Médias dos valores dos módulos de elasticidade e de cisalhamento, considerando apenas os valores obtidos pela aplicação da Equação da Teoria das Vigas de Timoshenko, para os vãos 265 mm e 238 mm, consideradas as posições A e B, em Compósitos de Fibras Longas	124
Tabela 21	Médias dos valores dos módulos de elasticidade e de cisalhamento, considerando apenas os valores obtidos pela aplicação da Equação da Teoria das Vigas de Timoshenko, para os vãos 265 mm e 238 mm, consideradas as posições A e B, em Compósitos de Fibras Curtas	124
Tabela 22	Dimensões Utilizadas nas Simulações de Vigas-Sanduíche	131
Tabela 23	Resumo dos parâmetros utilizados nas simulações de Vigas-Sanduíche	132
Tabela 24	Diferenças de Flechas Experimentais e Simuladas	133
Tabela 25	Quadro comparativo entre os produtos epoxídicos utilizados nas duas partes do trabalho	138
Tabela 26	Características dos Blocos de Compósitos.....	149
Tabela 27	Dimensões dos Corpos de Prova extraídos de cada Bloco.....	150
Tabela 28	Médias dos módulos de elasticidade e de cisalhamento, considerando apenas os valores obtidos pela aplicação da Equação d da Teoria das Vigas de Timoshenko, para os vãos 262 mm e 188 mm, consideradas as posições A e B. Bloco 1, Fibras Longas, 56,6% (m/m) de fibras.....	156
Tabela 29	Médias dos módulos de elasticidade e de cisalhamento, considerando apenas os valores obtidos pela aplicação da Equação da Teoria das Vigas de Timoshenko, para os vãos 262 mm e 188 mm, consideradas as posições A e B. Bloco 2, Fibras Longas, 63,4% (m/m) de fibras.....	156

Tabela 30	Médias dos módulos de elasticidade e de cisalhamento, considerando apenas os valores obtidos pela aplicação da Equação da Teoria das Vigas de Timoshenko, para os vãos 262 mm e 188 mm, consideradas as posições A e B. Bloco 3, Fibras Transversais, 67,5% (m/m) de fibras.....	158
Tabela 31	Médias dos módulos de elasticidade e de cisalhamento, considerando apenas os valores obtidos pela aplicação da Equação da Teoria das Vigas de Timoshenko, para os vãos 262 mm e 188 mm, consideradas as posições A e B. Bloco 4, Fibras Curtas, 31,9% (m/m) de fibras.....	158
Tabela 32	Cálculo dos valores de “ t ”, Posição A vs. Posição B.....	160
Tabela 33	Comparação estatística entre o Bloco 1 e o Bloco 2.....	161
Tabela 34	Resumo dos resultados de Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento obtidos neste trabalho.....	162

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

UFPR	- Universidade Federal do Paraná;
UDESC	- Universidade do Estado de Santa Catarina;
PIPE	- Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná;
PVC	- Poli(cloreto de vinila);
NaOH	- Hidróxido de Sódio;
V/V	- Volume por volume
PP	- Polipropileno;
m/m	- Massa por massa;
MPa	- Mega Pascal;
GPa	- Giga Pascal;
CaCO ₃	- Carbonato de Cálcio;
PEAD	- Polietileno de alta densidade;
PET	- Poli(tereftalato de etileno);
PPMA	- Polipropileno maleatado;
PVDF	- Poli(fluoreto de vinilideno);
g/cm ³	- Grama por centímetro cúbico;
μm	- Micro metro;
L_c	- Comprimento crítico médio;
σ	- Tensão de flexão;
H ₂ O ₂	- Peróxido de hidrogênio;
E	- Módulo de elasticidade ou Módulo de Young;
ε	- Deformação máxima ou deformação específica;
R\$	- Real (moeda oficial do Brasil);
US\$	- Dólar americano (moeda oficial dos Estados Unidos da América);
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas;
NBR	- Norma brasileira;
kgf/m ³	- Quilograma força por metro cúbico;
MOE	- Módulo de elasticidade à flexão;

MOR	- Módulo de ruptura á flexão;
$F_{c90,P}$	- Compressão normal – Placa;
R_{ao}	- Resistência ao arrancamento lateral;
R_{a90}	- Resistência ao arrancamento normal;
F_h	- Dureza Janka;
MCL	- Madeira laminada colada;
PSL	- “ <i>Paralell strand lumber</i> ”;
LVL	- Laminado colado;
kN	- Quilo Newton;
km	- Quilômetro;
α	- Coeficiente de proporcionalidade ou coeficiente de “ <i>souplesse</i> ”;
\sim	- Proporcional;
m	- Coeficiente de Poisson;
ν	- Módulo de Poisson;
F	- Força aplicada;
P	- Força aplicada;
ε_t	- Deformação específica transversal;
τ	- Tensão cisalhante ou de corte;
S	- Superfície considerada;
γ	- Deformação angular ou tensão cisalhante desenvolvida na interface;
θ	- Ângulo genérico;
E_θ	- Módulo de elasticidade medido em relação ao ângulo θ ;
S_{iv}	- Constantes relativas às propriedades mais comuns dos compósitos;
G	- Módulo de cisalhamento longitudinal;
E_{90}	- Módulo de elasticidade perpendicular às fibras;
E_0	- Módulo de elasticidade longitudinal;
u, v	- Deslocamento elástico;
H	- Constante para um determinado compósito;
E_f	- Módulo de elasticidade ou de Young, de uma fibra ou do material da face de uma viga-sanduíche;

A_f	- Área da seção reta de uma fibra;
σ_f	- Tensão desenvolvida em uma fibra;
σ_m	- Tensão desenvolvida na matriz de um compósito;
E_m	- Módulo de elasticidade da matriz de um compósito;
ϑ	- Fração volumétrica de fibras em m compósito;
σ_o	- Tensão longitudinal média em um compósito;
G_m	- Módulo de cisalhamento da matriz de um compósito;
ASTM	- American Society for Testing and Materials;
D	- Rigidez de flexão ou flexional;
I	- Momento de inércia;
E_c	- Módulo de elasticidade do material do núcleo de uma viga-sanduíche;
t_f	- Espessura das faces ou lâminas de um viga-sanduíche;
t_c	- Espessura do núcleo de uma viga-sanduíche;
b	- Largura da seção reta;
d	- Distância entre os centros das faces ou lâminas de uma viga-sanduíche;
FTIR	- Análise de Espectrometria na Região do Infra-vermelho por Transformada de Fourier;
TGA	- Análise Termogravimétrica;
CI	- Índice de cristalinidade;
I_{002}	- Intensidade da linha mais importante;
I_{Am}	- Intensidade atribuída à parte amorfa da celulose;
$\% h$	- Índice de absorção de água;
P_{seco}	- Peso seco;
$P_{saturado}$	- Peso saturado;
$\% h_{ar}$	- Índice de umidade, ao ar;
$\% h_{24}$	- Índice de umidade, com 24 horas de imersão;
$\% h_{dif}$	- Diferença de umidade absorvida;
H_2O	- Óxido de Hidrogênio (água);
TAPPI	- Associação Técnica da Indústria de Polpa de Madeira;
C	- Fator de correção de umidade;
mS	- Massa seca;

mU	- Massa úmida;
g	- Grama;
C%	- Teor de cinzas em porcentagem;
A	- Massa de cinzas;
B	- Massa de amostra;
$\%E_f$	- Porcentagem de produtos solúveis em água fria;
P	- Massa inicial da amostra;
P_1	- Massa após o ensaio;
$\%E_q$	- Porcentagem de produtos solúveis em água quente;
$\%E_{et}$	- Porcentagem de extrativos totais;
pH	- Potencial hidrogeniônico;
mm/min	- Milímetro por minuto;
mm	- Milímetro;
%	- Porcentagem;
°C	- Grau centígrado;
tf	- Tonelada-força;
E_{ap}	- Módulo de elasticidade aparente;
L	- Distância entre apoios (vão);
f	- Deformação ou flecha;
E_v	- Módulo de elasticidade verdadeiro;
k	- Fator de forma;
K	- Coeficiente de cisalhamento;
h	- Altura d seção reta da amostra (corpo de prova);
CP	- Corpo de prova;
FL	- Fibras longas;
FC	- Fibras curtas;
FT	- Fibras curtas transversais;
A	- Área da seção reta do corpo de prova;
vs.	- “Versus”;
LAME	- Laboratório de Materiais e Estruturas - LAME/LACTEC;
LACTEC	- Institutos de Tecnologia para o Desenvolvimento;
DEMEC	- Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná – DEMEC/UFPR;

gf	- Grama-força;
gf/cm^3	- Grama-força por centímetro cúbico;
h	- Hora;
kgf	- Quilograma-força;
H_0	- Hipótese nula;
H_1	- Hipótese alternativa;
t	- Escore ou estatística amostral;
σ	- Desvio padrão da população;
N	- Número de amostras de cada conjunto;
\bar{X}	- Média amostral;
$A_s; B_s$	- Desvio padrão de cada conjunto;
$\mu_A; \mu_B$	- Populações em comparação;
G_{fl}	- Módulo de cisalhamento do compósito de fibras longas;
G_{fc}	- Módulo de cisalhamento do compósito de fibras curtas;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	PROBLEMA A SER ABORDADO.....	26
1.2	INTERRUPÇÃO DO ACORDO DE PESQUISA	27
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	28
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	30
2.1	ESTUDOS DE COMPÓSITOS DE MATRIZES POLIMÉRICAS E FIBRAS NATURAIS	30
2.2	BAMBU – O VEGETAL	35
2.2.1	Classificação	35
2.2.2	O Rizoma	35
2.2.3	O Colmo	36
2.2.4	Características físicas e mecânicas dos colmos	37
2.2.5	O cultivo	37
2.2.6	A colheita dos colmos.....	38
2.3	TAQUARA-LIXA E SUA UTILIZAÇÃO COM REFORÇO EM COMPÓSITOS DE MATRIZES POLIMÉRICAS	38
2.4	RESULTADOS OBTIDOS NOS TRABALHOS ANTERIORES DO GRUPO DE PESQUISA UDESC-UFPR	40
2.5	COMPÓSITOS DE MATRIZES DE RESINA EPÓXI REFORÇADAS COM FIBRAS VEGETAIS, COMO ALTERNATIVA PARA MADEIRA, EM APLICAÇÕES DE ENGENHARIA FERROVIÁRIA	42
3	ABORDAGEM TEÓRICA	45
3.1	DEFINIÇÕES DE INTERESSE	45
3.2	JUSTIFICATIVA TEÓRICA	51
3.2.1	Introdução.....	51
3.2.2	Anisotropia das propriedades mecânicas	52
3.2.3	Reforço usando fibras curtas.....	54

3.3	A APLICAÇÃO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS VEGETAIS EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS TIPO SANDUÍCHE.....	58
3.3.1	Introdução.....	58
3.3.2	Comportamento mecânico de um sistema estrutural em sanduíche	59
3.4	CONCLUSÃO.....	62
4	DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	63
4.1	INTRODUÇÃO	63
4.2	MATERIAIS	65
4.2.1	Matriz polimérica	65
4.2.2	Fibras vegetais utilizadas	65
4.3	EQUIPAMENTOS DE LABORATÓRIO	66
4.3.1	Balança	66
4.3.2	Estufa	66
4.3.3	Calandra	67
4.3.4	Molde.....	67
4.3.5	Máquina Universal de ensaios	68
4.3.6	Prensa para o preparo dos compósitos	68
4.3.7	Microscópio óptico	68
4.3.8	Deflectômetro eletrônico	69
4.3.9	Destilador	69
4.3.10	Análise Térmica	69
4.3.11	FTIR	70
4.3.12	Difratometria de Raios-X	70
4.4	MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DA TAQUARA-LIXA	70
4.4.1	Caracterização por imagens micrográficas	70
4.4.2	Índices de Cristalinidade e Difratometria de Raios-X.....	70
4.4.3	Testes de Absorção de Água nos Compósitos	72
4.4.4	Composição Química	73
4.4.4.1	Determinação do teor de umidade	74
4.4.4.2	Determinação do teor de cinzas (Material Inorgânico)	75

4.4.4.3	Solubilidade em água fria.....	76
4.4.4.4	Solubilidade em água quente	76
4.4.4.5	Determinação do pH.....	77
4.4.4.6	Teor de extrativos totais.....	78
4.4.4.7	Teor de lignina insolúvel.....	79
4.4.4.8	Teor de holocelulose (celulose + hemicelulose)	81
4.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
4.5.1	Caracterização das fibras de taquara-lixo por imagens de microscopia óptica	81
4.5.2	Análise térmica	82
4.5.3	Índice de cristalinidade	83
4.5.4	Análise de espectrometria na região do infravermelho por transformada de Fourier – FTIR.....	87
4.5.5	Análise da composição química.....	88
4.5.6	Ensaio de absorção de água pelo compósito.....	92
4.5.7	Ensaio de Flexão de Três Pontos	93
4.6	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	95
4.6.1	Preparo das fibras	95
4.6.2	Preparo dos compósitos de matriz de resina epóxi, reforçados com fibras longas e curtas de taquara-lixo	98
5	INVESTIGAÇÃO METODOLÓGICA PARA DEFINIR UMA FERRAMENTA DE CÁLCULO PARA A CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS - PRIMEIRA PARTE.....	101
5.1	PRIMEIRA ETAPA – MÉTODO ASTM D198 – 2013 (MÉTODO DOS VÃOS VARIÁVEIS	101
5.1.1	Metodologia proposta	101
5.1.2	Discussão	108
5.1.3	Conclusões da primeira etapa	112
5.2	SEGUNDA ETAPA – APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE TIMOSHENKO, BASEADA NA TEORIA DAS VIGAS	114
5.2.1	Metodologia proposta	114
5.2.2	Simulações	116

5.2.3	Análise e discussão dos resultados	118
5.2.3.1	Módulos vs. Vãos.....	118
5.2.3.2	Módulos vs. Razão h/L	120
5.2.3.3	Diferenças entre Flechas Experimentais e Simuladas vs. Razão h/L	121
5.2.3.4	Considerações sobre as Normas de Referência.....	123
5.2.3.5	Critério de cálculo para Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento.....	123
5.2.4	Conclusão da segunda etapa	125
5.3	TERCEIRA ETAPA – SIMULAÇÕES DE UMA VIGA SANDUÍCHE CONFORME CORPO DE PROVA ENSAIADO	126
5.3.1	Descrição do experimento	126
5.3.2	Simulações da viga-sanduíche	130
5.3.3	Estudo comparativo das deformações simuladas e experimentais	132
5.3.4	Resultados e Discussões deste Estudo	133
5.3.5	Estudo comparativo da Rigidez Flexional da Viga-sanduíche .	133
5.3.6	Análise e discussão dos resultados deste estudo	135
5.3.7	Conclusão desta etapa	136
6	APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO PARA DETERMINAÇÃO DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE E DE CISALHAMENTO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ EPÓXICA REFORÇADOS COM FIBRAS DE TAQUARA-LIXA – SEGUNDA PARTE EXPERIMENTAL.....	137
6.1	INTRODUÇÃO.....	137
6.2	MATERIAIS UTILIZADOS.....	138
6.2.1	Matriz de resina epóxi	138
6.2.2	Fibras de Taquara-lixo	138
6.3	EQUIPAMENTOS DE LABORATÓRIO UTILIZADOS.....	139
6.3.1	Prensa hidráulica	139
6.3.2	Máquina Universal de Ensaio.....	139
6.3.3	Deflectômetro EMIC EE05.....	140

6.3.4	Estufa.....	141
6.3.5	Balanças.....	141
6.3.6	Guilhotina.....	141
6.4	DESCRIÇÃO DOS BLOCOS DE COMPÓSITOS PREPARADOS	141
6.5	MÉTODO DE ENSAIO.....	151
6.5.1	Ensaio de Flexão de Três Pontos.....	151
6.5.2	Procedimento aplicado para obtenção dos valores dos Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento pelo método proposto – “Método Timoshenko”	153
6.5.3	Procedimentos de ensaio.....	154
6.5.4	Avaliação estatística dos resultados.....	158
6.5.4.1	Considerações a respeito da Teoria da Decisão Estatística.....	158
6.5.4.2	Problemas de estatística a serem solucionados	159
6.5.5	Resultados e discussão da Segunda Parte Experimental.....	162
6.5.6	Conclusões relativas à Segunda Parte do procedimento experimental.....	164
6.6	ESTUDO COMPARATIVO DE CUSTOS DE MATERIAIS.....	168
7	COMENTÁRIOS E CONCLUSÃO FINAL	170
8	SUGESTÕES PARA A SEQUÊNCIA DO TRABALHO	176
8.1	AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE FIBRAS NOS VALORES DE CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS .	176
8.2	PESQUISA DE OUTROS MATERIAIS COMPÓSITOS.....	176
	REFERÊNCIAS.....	177
	APÊNDICES	185
	APÊNDICE A - GRÁFICOS DE “FORÇA VS. DEFORMAÇÃO” DE TODOS OS ENSAIOS, REFERENTES À PRIMEIRA PARTE DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL (PRIMEIRA E SEGUNDA ETAPAS)	186
	APÊNDICE B - GRÁFICOS E TABELAS CORRESPONDENTES	

À DISCUSSÃO DA SEGUNDA ETAPA DA PRIMEIRA PARTE DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	189
APÊNDICE C - TABELAS COMPARATIVAS DE VALORES DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE E DE CISALHAMENTO ASTM VS. TIMOSHENKO (PRIMEIRA PARTE)	201
APÊNDICE D - GRÁFICOS DE “FORÇA VS. DEFORMAÇÃO” DE TODOS OS ENSAIOS, REFERENTES À SEGUNDA PARTE DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	203
ANEXOS	210
ANEXO A - TABELAS DE VALORES MÉDIOS DE MADEIRAS DICOTILEDÔNEAS E CONÍFERAS, NATIVAS E DE REFLORESTAMENTO, EXTRAÍDAS DA NORMA ABNT NBR 7190:1997	211
ANEXO B - TABELA DE VALORES DOS PERCENTIS (t_p), PARA DISTRIBUIÇÃO t DE STUDENT (EXTRAÍDA DE “MANUAL DE FÓRMULAS E TABELAS MATEMÁTICAS”; SPIEGEL, M. R.; 1974; EDITORA MC GRAW-HILL DO BRASIL, LTDA.)	214

1 INTRODUÇÃO

No ano de 2010 foi concebida uma linha de pesquisa em Engenharia e Ciência dos Materiais em que se pretendia estudar o desenvolvimento de materiais estruturais poliméricos alternativos para engenharia. Tratava-se de uma parceria a ser desenvolvida entre o Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade Estadual de Santa Catarina – UDESC/Joinville e o Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná – PIPE/UFPR, viabilizada através de um compromisso entre os Professores Ricardo Pedro Bom, da UDESC/Joinville e Thais Helena Sydenstricker Flores-Sahagun, do PIPE/UFPR. Nesse compromisso, foram colocados à disposição dos pesquisadores das duas entidades os recursos materiais e os equipamentos dos laboratórios de pesquisa coordenados pelos dois professores.

Havendo na época, a intenção de pesquisar-se o desenvolvimento de dormentes ferroviários de compósitos poliméricos, expressa na apresentação da Proposta de Projeto de Tese de Doutorado, ao PIPE/UFPR, que compreendia **“Estudos para Desenvolvimento de Dormentes de Compósito Polimérico”** e tendo em vista a total convergência dos temas, ficou decidida a incorporação deste trabalho àquela Linha de Pesquisa, porquanto pareciam evidentes as vantagens que a soma dos esforços de pesquisa traria no sentido de serem atingidos os objetivos preconizados. Dessa forma, passaram a compor o Grupo de Pesquisa, os pós-graduandos: Carlos A. Alves Jr. – Mestrando e Elton G. dos Reis – Mestrando, ambos vinculados ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, do Departamento de Engenharia Mecânica, da UDESC/JOINVILLE e Camilo Borges Neto – Doutorando, vinculado ao PIPE/UFPR.

O compromisso firmado entre os Professores Coordenadores pertencentes a UDESC e UFPR visava o desenvolvimento das pesquisas e previa o intercâmbio de informações e resultados obtidos.

De imediato passou-se ao desenvolvimento de três trabalhos:

1. **“Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos de matriz poliéster, com gravetos ou fibras de taquara-lixá (*Merostachys sp.*)”, para**

a Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais de Carlos A. Alves Jr., orientada pelo Prof. Dr. Ricardo Pedro Bom e defendida em 2012;

2. **“Compósitos de fibras de taquara (*Merostachys sp.*) e matriz poliéster e epóxi”**, para a Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais de Elton Garcia dos Reis, orientada pelo Prof. Dr. Ricardo Pedro Bom e defendida em 2013;
3. **“Desenvolvimento de compósitos de resina epóxi e fibras de taquara-lixia (*Merostachys skvortzovii* Sendulsky), para aplicações estruturais”**, para a Tese de Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais de Camilo Borges Neto, orientada pela Professora Thais Helena Sydenstricker Flores-Sahagun e co-orientada pelo Prof. Dr. Ricardo Pedro Bom.

1.1 PROBLEMA A SER ABORDADO

A linha de pesquisa criada previa o desenvolvimento continuado dos compósitos de poliéster e epóxi, reforçados com fibras vegetais diversas, de modo que se estudassem estes materiais em diversas formas, frações volumétricas e adotando-se diversos processos de tratamento das fibras vegetais, procurando-se com isso a obtenção de um produto mais apropriado às aplicações estruturais desejadas (dormentes ferroviários, vigas estruturais, placas estruturais, painéis para pisos e paredes, etc.). A vantagem principal do estabelecimento de uma linha de pesquisas seria o fato de que procedimentos de obtenção, preparo, caracterização e adequação de materiais e métodos seriam estudados gradativamente, não precisando ser repetidos nas fases mais avançadas das pesquisas.

O desenvolvimento de materiais alternativos tem como finalidade a obtenção de produtos com maior durabilidade nas condições usuais, com custos competitivos e vantagens oferecidas por suas características físicas e mecânicas.

Cabe recordar o que já se testemunhava em 1997, em monografia acadêmica analisando o mercado de madeiras serradas para utilização na construção civil:

Como engenheiro civil e convivendo com o dia-a-dia das construções, por ocasião das cotações de preço de madeira serrada para execução de escoramentos e formas, percebemos ao longo do tempo, um crescimento sensível nos preços da madeira de pinho do Paraná, assim como das madeiras de lei, concomitantemente, com sua progressiva escassez, principalmente, quando melhor qualidade era exigida, tendo em vista as necessidades particulares de algum projeto ou obra. (BORGES NETO, 1997).

Na verdade, o estado atual do mercado de madeira serrada e outros materiais de construção reforça ainda mais esta antiga constatação, justificando por si só a pesquisa de alternativas viáveis ao uso da madeira.

Os materiais compósitos poliméricos vêm sendo pesquisados por muitos autores tendo em vista oferecerem facilidade de fabricação em larga escala e, no caso do reforço com fibras vegetais, trazerem vantagens adicionais, tais como: baixo custo relativo, boas características de resistência à tração, facilidade de obtenção, ausência de abrasividade aos equipamentos utilizados em sua manipulação, não toxicidade ao ambiente e ao ser humano, biodegradabilidade e, no caso da fibra de taquara, a boa compatibilidade com as matrizes poliméricas e acima de tudo por serem oriundos de fontes renováveis.

1.2 INTERRUPÇÃO DO ACORDO DE PESQUISA

Cumprir informar que ao ser aceito o pedido de renúncia ao cargo de co-orientador deste trabalho, encaminhado ao PIPE/UFPR, pelo Prof. Ricardo Pedro Bom, Coordenador do Grupo de Pesquisa da UDESC/Joinville, ficou desfeito o acordo de colaboração com o Grupo da UFPR/PIPE e que estando este trabalho já em sua fase final, após a defesa de Qualificação, ficou decidido que seria o mesmo complementado e finalizado de forma independente, pelo Autor e Doutorando Camilo Borges Neto, a partir de então, unicamente, com Orientação Acadêmica da Professora Thais Helena Sydenstricker Flores-Sahagun, preservando-se, integralmente, onde a este couberem os respectivos créditos intelectuais pelo trabalho assim como, também, os direitos de propriedade industrial, produzidos e desenvolvidos pelos pesquisadores até então participantes sendo, inclusive, invocado e reconhecido o direito de sigilo industrial, no prazo legal, em favor do Prof.

Dr. Ricardo Pedro Bom, como proprietário das eventuais patentes resultantes das pesquisas por ele conduzidas.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em oito capítulos, apêndice e anexos.

O Capítulo 1 corresponde à introdução ao trabalho.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão de literatura disponível sobre o assunto de compósitos de matrizes poliméricas e reforçadas com fibras vegetais, além de uma breve abordagem sobre o bambu e suas particularidades. São também apresentados alguns resultados obtidos em trabalhos dos pesquisadores do grupo de pesquisas original. Também é feita uma apresentação sobre a utilização dos citados compósitos, como alternativa à madeira em algumas aplicações de engenharia.

A abordagem teórica é apresentada no Capítulo 3, onde são rememoradas algumas definições importantes, discutida a justificativa teórica para as propriedades mecânicas de compósitos considerando a capacidade de reforço proporcionada pelas fibras, em uma matriz e, finalmente, feita uma introdução a respeito do comportamento mecânico de um sistema estrutural em forma de sanduíche.

O desenvolvimento experimental é apresentado no Capítulo 4. Nele são detalhadas informações sobre materiais, equipamentos e os métodos de caracterização das fibras e de preparo das amostras de compósitos utilizados ao longo da pesquisa, sendo aqui analisados e discutidos os resultados obtidos.

No Capítulo 5 é apresentada a investigação metodológica feita para definir uma ferramenta de cálculo para ser usada na caracterização de materiais compósitos. É analisado um dos métodos disponíveis (ASTM D198-2013) para tanto, proposto um novo método (Timoshenko) e feita uma comparação entre eles, através da utilização de ensaios de flexão de três pontos em amostras de compósitos preparadas e de simulações pelo Método dos Elementos Finitos, incluindo aqui um estudo em bloco de compósito em forma de viga sanduíche.

No Capítulo 6 é apresentada a aplicação do método proposto (Timoshenko) utilizando-se para isso novos corpos de prova preparados conforme a metodologia anteriormente descrita, tendo como objetivo corroborar os resultados anteriores e

elucidar algumas dúvidas a respeito da forma de seção, da fração volumétrica de fibra e da posição das seções retas dos corpos de prova ensaiados.

O Capítulo 7, Comentários e Conclusões Finais, apresenta uma resenha das conclusões das etapas parciais do trabalho e descreve os objetivos atingidos.

O Capítulo 8 traz as sugestões apresentadas, para a continuidade da linha de pesquisa e, finalmente, são relacionadas as Referências Bibliográficas.

No Apêndice apresentam-se gráficos e tabelas que serviram de ferramenta para os cálculos elaborados e em Anexos são apresentadas tabelas citadas no trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESTUDOS DE COMPÓSITOS DE MATRIZES POLIMÉRICAS E FIBRAS NATURAIS

Materiais fabricados a partir de resíduos de madeira e mesmo materiais compósitos de matrizes diversas, reforçados com fibras sintéticas que são de difícil reciclagem, vêm sendo substituídos por materiais alternativos, fabricados com utilização de fibras vegetais em sua composição. (REIS, 2013).

Entre as fibras naturais disponíveis para estudos, a fibra de bambu, mostra-se como uma opção vantajosa, tendo em vista suas características físicas e mecânicas destacadas, além de ser de fácil obtenção e baixo custo. As fibras de bambu apresentam resistência à tração comparáveis às encontradas no aço, além de apresentarem boa aderência com matrizes poliméricas (MARQUEZ; MEIRELLES, 2006; RAJULU *et al.*, 2004).

Das *et al.* (2006) estudaram o efeito da mercerização de bambu nas propriedades mecânicas de compósitos de resina fenólica unidirecionais. As propriedades mecânicas dos compósitos foram maximizadas com o tratamento do bambu, com álcali, em concentrações de 16-20% (m/m), comparadas àquelas de compósitos em que os mesmos não foram submetidos a qualquer tratamento.

Das e Chakraborty (2007) também estudaram o papel da mercerização de bambu nas propriedades de impacto de compósitos de resina fenólica unidirecionais. Foi observado um aumento na energia de fratura dos compósitos preparados com fibras tratadas com álcali em relação aos compósitos preparados com fibras não tratadas.

Shih (2007) estudou propriedades mecânicas e térmicas de resíduos de compósitos fibras-casca de bambu/epóxi e foi observado que quando as fibras são tratadas com agentes de acoplamento, há melhor compatibilidade fibra/matriz.

Kim *et al.* (2008) estudaram a preparação e as propriedades mecânicas de compósitos poli(cloreto de vinila – PVC/farinha de bambu utilizando como agente de acoplamento o copolímero em bloco poli (estireno-co-anidrido maleico). Com o aumento da concentração do copolímero nos compósitos, as propriedades mecânicas e morfológicas foram melhoradas.

Liu *et al.* (2008) avaliaram propriedades mecânicas e a morfologia de compósitos farinha de bambu/PEAD modificados por 0 a 8,3% m/m de elastômeros etileno/propileno maleatado ou polietileno maleatado. Foi observado que uma adesão interfacial adequada é obtida quando concentrações específicas de compatibilizantes poliméricos são empregadas.

Das e Chakraborty (2008) estudaram também o efeito do tratamento alcalino em fibras de bambu para reforço de poliéster insaturado. As propriedades mecânicas dos compósitos foram maximizadas nos compósitos contendo 50% m/m de fibras, quando a concentração de NaOH foi de 20% m/m.

Das e Chakraborty (2009) estudaram o efeito do tratamento de fibras de bambu com álcali (10, 15, 20 ou 25% m/m) nas propriedades mecânicas e morfologia de compósitos de matriz de resina fenólica contendo 50% m/m de fibras. O aumento da concentração de NaOH resultou em compósitos mais rígidos e resistentes à flexão e ao cisalhamento até a concentração máxima de 20% m/m. Os mesmos autores caracterizaram as fibras de bambu tratadas com álcalis (DAS; CHAKRABORTY, 2008).

Wong *et al* (2010) caracterizaram a fratura de compósitos de fibras curtas de bambu/poliéster insaturado. Foi estudado o efeito do uso de fibras de bambu de 4, 7 e 10 mm e foi concluído que o teor ótimo de fibras de bambu é de 40% V/V para as fibras de 7 mm e de 50% (V/V) para as fibras de 10 mm. A resistência de fratura dos compósitos preparados com 50% (V/V) de fibras de bambu de 10 mm, aumentou de 340% em relação à da matriz.

Biswas e Satapathy (2010) fizeram um estudo comparativo das características de erosão de compósitos fibras-de-vidro/epóxi e bambu modificado/epóxi. As fibras de bambu foram tratadas com diferentes teores de lama vermelha, um resíduo sólido gerado na fabricação da alumina. O processo de desgaste por erosão dos compósitos foi analisado por meio de um planejamento experimental de Tagushi. Foi concluído que os compósitos reforçados por fibras de bambu apresentaram propriedades mecânicas inferiores aos compósitos reforçados por fibras de vidro mas apresentaram melhor desempenho em relação ao desgaste erosivo.

Kushwaha e Kumar (2010) estudaram o efeito do tratamento de bambu com metacrilamida no desempenho de compósitos de resina epóxi ou poliéster insaturado. Propriedades mecânicas, térmicas e absorção de água dos compósitos

foram determinadas e foi concluído que o tratamento químico do bambu melhorou o desempenho destes materiais nestes quesitos.

Wegst (2011) analisa em seu trabalho a estrutura da palma e do bambu para explicar a eficiência mecânica desses materiais que não possuem uma distribuição de fibras uniforme, mas apresentam um gradiente de densidade e módulo de elasticidade na seção transversal das fibras. A eficiência de flexão, significando desempenho à flexão por unidade de massa de compósitos, analisada através dos gradientes de propriedades de bambu, palma e madeira foi comparada, sendo concluído que o bambu pode facilmente competir com materiais avançados de engenharia em muitas aplicações.

Gupta *et al.* (2011) estudaram o efeito de vários parâmetros (teor de vazios, concentração e tamanho de fibras de bambu) no comportamento mecânico e desgaste por erosão de compósitos bambu/epóxi. Foi relatada a variação de resistência a flexão (de 137,5 MPa para 173,8 MPa) com o crescimento da fração volumétrica de fibras (de 20% para 40% m/m), respectivamente.

Phuong *et al.* (2011) estudaram a morfologia e as propriedades de compósitos polipropileno (PP)/fibras de bambu. Foi observado que para compósitos com até 30% m/m de fibras curtas de bambu não tratadas, a permeabilidade a hélio aumenta. No entanto, quando as fibras de bambu são acetiladas, a permeabilidade a hélio cai devido à grafitação de grupos acetila na celulose, o que melhora a compatibilização entre a matriz de PP e as fibras de bambu.

Cai *et al.* (2011) estudaram o efeito da adição de poli(etileno-co-1-octeno) enxertado com metacrilato de glicidila, poli(etileno-co-octeno) enxertado com anidrido maleico ou poli(etileno-co-acrilato de butila-co-metacrilato de glicidila) em blendas com PP para melhora de propriedades mecânicas de compósitos reforçados por fibras de bambu. Foi observado que com a adição dos compatibilizantes poliméricos (6 a 8% m/m), os compósitos apresentaram grande melhora na resistência ao impacto.

Osório *et al.* (2011) desenvolveram um novo processo mecânico para extração de fibras longas de bambu *Guadua angustifolia*, para uso em compósitos estruturais bambu/epóxi. As fibras dessa espécie de bambu apresentam resistência à tração de 800 MPa e módulo de Young de 43 GPa. Foram realizados testes de flexão em compósitos com dois tipos de orientação de fibras, longitudinal ou transversal e as fibras usadas foram tratadas ou não com álcali. Os autores

concluíram que quando as fibras são tratadas, a resistência à flexão longitudinal é maior do que quando as fibras não são tratadas quimicamente. Por outro lado, os ensaios de flexão de três pontos na direção transversal, para os compósitos bambu/epóxi com fibras tratadas com álcali, mostraram que a resistência também é maior do que quando fibras não tratadas são usadas, mostrando um aumento da ordem de 33 MPa. Essa tendência aumenta ligeiramente com o decréscimo da concentração de álcali, sendo 3% o ideal. Foi concluído que o tratamento com álcali (NaOH) não compensa o ganho de resistência dos compósitos, tendo em vista as vantagens ambientais de não ser feito o tratamento alcalino que gera um volume de efluente relativamente grande e problemático.

Adhikari *et al.* (2012) estudaram a morfologia, propriedades mecânicas e térmicas de compósitos biodegradáveis farinha de bambu/copolíéster alifático-aromático. Foi observado que os compósitos podem ser usados em aplicações onde a exigência mecânica é baixa, concluindo-se haver necessidade de melhorar a compatibilidade matriz/*filler*, para promover melhorias nas suas propriedades mecânicas.

Xue *et al.* (2012) utilizaram a polimerização *in situ* para modificar as fibras de bambu apolares e melhorar sua compatibilidade com a matriz polar de PP. Foi utilizado um composto derivado do pirocatecol e cloreto férrico para revestir as fibras de bambu que em seguida foram usadas na preparação de compósitos de matriz de polipropileno. Em relação aos compósitos PP/bambu não tratadas, foi observado um aumento de 56% no alongamento no ponto de ruptura e 46% de acréscimo na curvatura máxima (Ensaio de Dobramento) sem serem, no entanto, observados acréscimos nas resistências a tração e flexão.

Kim *et al.* (2012) estudaram o efeito do tratamento de fibras de bambu com agente silânico e a adição de carbonato de cálcio em compósitos de matriz PP/polietileno reciclado. Em relação aos compósitos contendo apenas o CaCO_3 , os compósitos híbridos bambu/ CaCO_3 apresentaram módulo de elasticidade 3 a 4 vezes maior.

Hung *et al.* (2012) estudaram propriedades de compósitos polietileno de alta densidade (PEAD) reforçado por fibras de bambu acetiladas e o efeito da exposição ao tempo durante 120-240 dias. Foi concluído que o tratamento químico das fibras promoveu uma maior durabilidade e resistência dos compósitos aos efeitos atmosféricos.

Fuentes *et al.* (2013) estudaram o efeito da adesão superficial na resistência mecânica ao cisalhamento de compósitos termoplásticos reforçados por fibras de bambu, aplicando a teoria molecular-cinética da adesão superficial de líquidos. Foram utilizadas diferentes matrizes: poli(tereftalato de etileno) - PET, polipropileno maleatado - PPMA, poli(fluoreto de vinilideno) - PVDF e polipropileno - PP e testes de *pull-out* e flexão foram realizados. Os autores reportaram as propriedades de molhamento dinâmico das fibras de bambu e concluíram que o compósito PVDF/bambu apresentou a melhor combinação entre os parâmetros de molhamento, sendo isso uma consequência de fortes interações físicas na interface devidas à presença de componentes altamente ácidos no PVDF e de componentes altamente básicos na superfície da fibra de bambu.

Verma e Chariar (2013) pesquisaram a dureza e a resistência à tração de compósitos de resina epóxi laminados em quatro camadas. Valores teóricos e experimentais da rigidez e resistência à tração dos compósitos laminados foram comparadas e avaliadas através da carga de tração e da equação da regra das misturas, respectivamente. Um laminado unidirecional hipotético formado por quatro camadas unidirecionais foi proposto a partir de equações constitutivas de laminados em escala macroscópica e foi concluído que o material, teoricamente, pode ser usado em aplicações estruturais.

Alguns trabalhos foram desenvolvidos, pelo já citado grupo de pesquisas (UDESC–UFPR), considerando a utilização de gravetos e fibras de taquara-lixá (então identificada como *Merostachys spp.*), que é também uma espécie de bambu, como reforço de matrizes de poliéster e epóxi visando aplicações estruturais, como aquelas em que se procuram materiais de engenharia alternativos, para a fabricação de dormentes ferroviários e outros sistemas estruturais. (ALVES JUNIOR, 2012; REIS, 2013; FREDIANELLI, 2013). Na sequência serão apresentados resultados obtidos por estes autores no estudo e caracterização dos materiais envolvidos pela linha de pesquisa já descrita.

2.2 BAMBU – O VEGETAL

2.2.1 Classificação

Botanicamente o bambu está classificado como *Bambusae*, uma tribo da família das *Graminae*.

Pelas características do seu colmo o bambu é considerado como uma planta lenhosa, monocotiledônea, pertencente às angiospermas. A sua parte aérea – tronco ou caule das árvores – é denominada de colmo sendo, normalmente, oco e a parte subterrânea, constituída de rizoma e raízes. (PEREIRA, 2001). A Figura 1 mostra o aspecto de um bambuzal.

Figura 1 – Aspecto de um bambuzal.

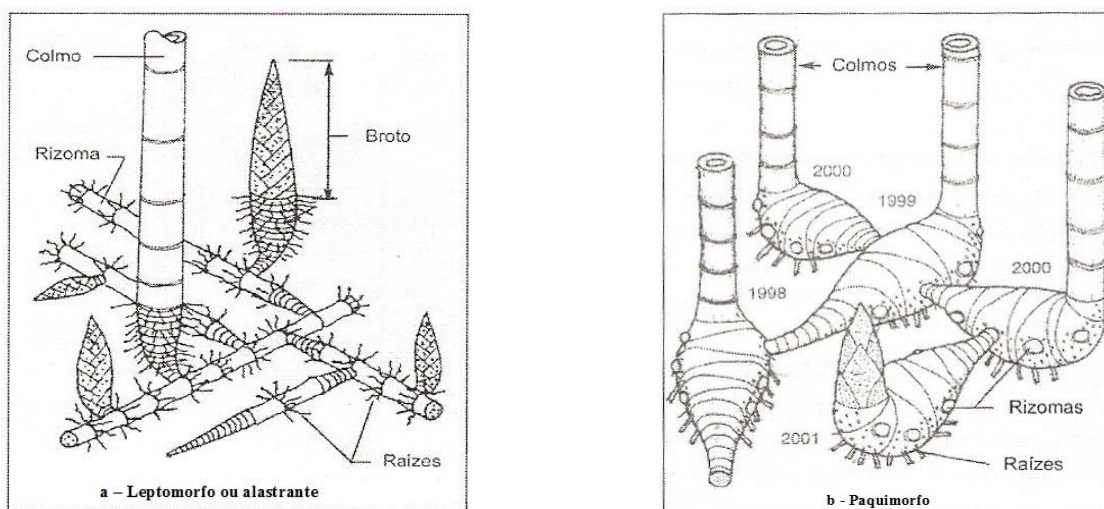


Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

2.2.2 O Rizoma

Com a forma semelhante à de uma raiz o rizoma é na verdade uma espécie de caule que se desenvolve sob a terra, entre as raízes e o caule propriamente ditos (Figura 2). O rizoma exerce papel importante no desenvolvimento da planta como armazenador de nutrientes e como órgão responsável pela propagação da planta. O nascimento de novos colmos se efetua pela multiplicação assexuada dos rizomas.

Figura 2 – Ilustração dos tipos de Rizoma



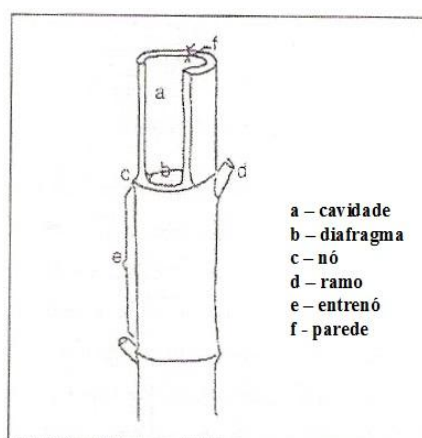
Adaptado de: (LOPEZ, 2003).

2.2.3 O Colmo

Os colmos têm a forma tubular, separada por paredes transversais ou diafragmas, posicionados em regiões de protuberâncias ou nós que separam câmaras ocas chamadas de entrenós. A grande concentração de fibras nesses nós proporciona grande resistência e flexibilidade ao bambu.

O diâmetro com que o colmo brota do solo não aumenta com o tempo tendo este, a partir de então a sua dimensão definitiva (Figura 3). O bambu não apresenta crescimento radial, no que é diferente das outras madeiras.

Figura 3 – Anatomia de um colmo de bambu



Adaptado de: (PEREIRA, 2001).

Por volta dos cinco anos após o plantio é que bambus atingem seu diâmetro máximo.

Os colmos brotam anualmente, geralmente, na estação das chuvas e estes brotos se alongam continuamente de 20 centímetros até 1 metro por dia dependendo da espécie.

A altura máxima de um colmo é atingida em um prazo entre 30 e 180 dias também dependendo da espécie do bambu, completando assim seu crescimento pouco tempo após o aparecimento do broto.

Espécies que formam moitas, normalmente, crescem a noite e de forma mais lenta do que aquelas consideradas alastrantes que se desenvolvem durante o dia. (PEREIRA, 2001).

O bambu cresce com velocidade 30% maior do que árvores consideradas de rápido crescimento. Registrou-se em 1956, no Japão o recorde de crescimento diário médio de 121 cm, em 24 horas, em uma planta da espécie *Phyllostachys bambusoides*, com 12 cm de diâmetro no colmo (FARHAT, 1967).

2.2.4 Características físicas e mecânicas dos colmos e das fibras

O tecido de um colmo de bambu é composto pelas células de parênquimas (50%), pelas fibras (40%) e pelos feixes vasculares (10%). (LIESE, 1985).

Fibras de bambu de diversas fontes apresentam densidades na faixa de 0,88-1,1 g/cm³, diâmetro na faixa de 100-200 µm, resistência à tração na faixa de 391-713 MPa e módulo de Young na faixa de 18-55 GPa (OSÓRIO *et al*, 2011).

2.2.5 O cultivo

O bambu não exige técnicas complexas para o seu estabelecimento como plantação.

A irrigação só seria necessária em regiões em que a pluviosidade fosse muito baixa, não sendo necessária a aplicação de agrotóxicos.

2.2.6 A colheita dos colmos

Assim como acontece com a maioria das madeiras, uma colheita correta tem grande influência na qualidade dos colmos em sua utilização como material de construção.

É então muito importante observar a idade, a estação do ano e a fase da lua no período de corte.

As propriedades físicas e mecânicas do material colhido têm relação direta com o teor de umidade do colmo no momento da colheita. A quantidade de fissuras e rachaduras é diretamente proporcional a este teor de umidade.

A vulnerabilidade ao ataque de insetos e fungos estará diretamente relacionada com as quantidades de amido e açúcares presentes no colmo sendo estas por sua vez, também diretamente relacionadas com a quantidade de água presente.

Para que se obtenham colmos com menor teor de umidade, estes devem ser colhidos na estação de menor pluviosidade, quando os solos estão secos e a atividade de líquidos é menor em seu interior (LOPEZ, 2003).

Nas diversas culturas que utilizam bambu como material, é crença que há uma grande influência das fases da lua na qualidade do bambu colhido. Nelas é preservada a tradição de colher o bambu, na lua minguante. (LOPEZ, 2003).

Estudos mostraram que as quantidades de carboidratos totais em amostras de bambu são menores naqueles colhidos na fase lunar do quarto minguante. (PINZON, 2002).

2.3 TAQUARA-LIXA E SUA UTILIZAÇÃO COMO REFORÇO EM COMPÓSITOS DE MATRIZES POLIMÉRICAS

Taquara (na verdade, uma espécie de Bambu) é a denominação comum a várias espécies destas gramíneas nativas da América do Sul, a maioria com caules ocos e segmentados em gomos, em cujas intersecções (nós) se prendem as folhas.

No Brasil há 18 gêneros e 155 espécies de taquaras e bambus (*Poaceae*), entre elas se destacam a *Bambusa taquara* que é abundante no Rio Grande do Sul, a *Bambusa vulgaris*, muito usada em reflorestamento na região Nordeste, a *Guadua*

refracta, muito comum em Goiás, a *Nastus barbatus* que é comum em São Paulo e no Paraná e a *Guadua weberbaueri*, encontrada em todo Brasil. O gênero *Merostachys* possui 53 espécies que se distribuem desde a América Central até a Argentina. A literatura mostra controvérsias na identificação de algumas espécies pertencentes ao gênero *Merostachys*, sobretudo no grupo formado por *M. multiramea* e de algumas espécies similares de difícil distinção morfológica. (LIEBSCH; REGINATO, 2009). Liebsch e Reginato (2009) concluíram ser definida como *Merostachys skvortzovii* Sendulsky a espécie vulgarmente conhecida por taquara-lixá. Seria assim melhor definida como *Merostachys spp.* a espécie também vulgarmente conhecida como taquara-poca.

Taquaras e bambus são vegetais semelparos, ou seja, seu ciclo termina com a morte dos indivíduos após o florescimento, sendo que o período vegetativo varia de três a 120 anos. O descontrole populacional de taquaras em alguns locais é apontado por alguns autores como fator inibidor da regeneração natural de espécies arbóreas. (SMITH *et al.*, 1981). Conforme se constata por Liebsch e Reginato (2009), a espécie, utilizada nesse trabalho, trata-se da *Merostachys skvortzovii* Sendulsky que é vulgarmente conhecida como taquara-lixá. A taquara-lixá é encontrada ao longo de grandes extensões territoriais, principalmente na região da Floresta Ombrófila Mista, ou seja, na Floresta com Araucária e seus eventos reprodutivos repetem-se em intervalos de 30 a 34 anos. (LIEBSCH; REGINATO, 2009). A Figura 4 apresenta a taquara lixa em seu habitat natural.

Figura 4 – Taquara-lixá (*Merostachys skvortzovii* Sendulsky).



Fonte: (LOPES, 2014).

Alves (2012), pesquisou a utilização de taquara-lixo na forma de gravetos em matriz de poliéster, obtendo módulos de elasticidade da ordem de 19,9 GPa e tensão máxima à flexão em torno de 175,5 MPa, sugerindo em seu trabalho, ser possível a utilização deste material compósito em substituição aos dormentes feitos de eucalipto. Entretanto, o sistema utilizado por Alves apresentou delaminação na interface graveto/resina. A realização de tratamento químico da superfície do graveto aumentou o módulo de elasticidade e a tensão máxima a ruptura, porém, não evitou o efeito de delaminação.

Nesta mesma linha de trabalho, Reis (2013), procurou desenvolver e caracterizar mecanicamente compósitos utilizando como matriz resinas de poliéster e epóxi empregando como reforço, fibras agrupadas de taquara-lixo tratadas com álcali. Neste trabalho o autor estudou compósitos com diferentes frações volumétricas de fibras longas e alinhadas e fibras curtas e aleatoriamente direcionadas, visando a determinação da tensão máxima de flexão, do módulo de elasticidade e da massa específica dos compósitos. O maior inconveniente no processo utilizado por Reis (2013) foi à quantidade de resíduos químicos gerados pelo processo de tratamento das fibras, tendo sido relatada também a dificuldade encontrada durante a moldagem dos corpos de prova de matriz poliéster em vista do tempo de gel do produto estar entre 10 e 15 minutos, apenas.

2.4 RESULTADOS OBTIDOS NOS TRABALHOS ANTERIORES DO GRUPO DE PESQUISA UDESC–UFPR

O teor de umidade médio obtido para a taquara utilizada por Reis (2013) foi de 46,3%. Após os tratamentos químicos efetuados com solução de hidróxido de sódio (NaOH) e clareamento com peróxido de hidrogênio (H_2O_2), ele concluiu que o rendimento de fibras foi em média de 85,8% e que a tensão de ruptura das fibras foi em média de 534,2 MPa. Utilizando matriz de poliéster, nos ensaios de *pull-out* obteve um comprimento crítico médio (L_c) de 12,0 mm para uma tensão de cisalhamento média de 11,13 MPa. Com ensaios de flexão da matriz de poliéster utilizada, calculou a Tensão Média de Flexão (σ) em 60,4 MPa, Módulo de Elasticidade (E) em 2,8 GPa e deformação máxima (ϵ) em 0,02146 mm/mm.

O maior teor de fibras ensaiado nessa matriz foi de 75% m/m. Reis (2013) relatou que para compósitos com teor de fibras longas em torno de 75% (m/m), a tensão à flexão variava entre 219,6 e 220,0 MPa e o Módulo de Elasticidade variava entre 21,3 e 22,0 GPa. Consideradas as frações volumétricas das fibras e da matriz e os resultados da deformação máxima (mm/mm) dos compósitos, o valor médio da deformação de todos os corpos de prova ensaiados atingiu o valor de 0,00989 mm/mm. O menor teor de fibras ensaiado pelo citado autor foi de 40%, para compósitos de fibras longas e a tensão variou entre 141,3 e 154,7 MPa e o Módulo de Elasticidade variou entre 13,7 e 14,0 GPa. Os valores aumentaram quando era aumentado o teor de fibra nos compósitos.

Ainda no mesmo trabalho, Reis (2013) utilizando matriz de epóxi, nos ensaios de *pull-out* obteve um comprimento crítico médio (L_c) de 13,4 mm para uma tensão de cisalhamento média de 9,16 MPa. Com ensaios de flexão da matriz de epóxi utilizada obteve tensão média de flexão (σ) igual a 86,6 MPa, Módulo de elasticidade (E) de 2,4 GPa e deformação máxima (ϵ) de 0,0358 mm/mm.

Os ensaios de flexão feitos por esse autor em compósitos com matriz de epóxi mostraram ainda, que as propriedades mecânicas, módulo de elasticidade e tensão de flexão também aumentaram quando era aumentado o teor de fibra nos compósitos. O maior teor de fibras ensaiado por Reis (2013) foi de 75% m/m. Para estes compósitos com teor de fibras longas de 280 mm em torno de 75%, ele concluiu que a tensão à flexão variava entre 207,3 e 216,6 MPa e o Módulo de Elasticidade variava entre 23,0 e 24,2 GPa. Consideradas as frações volumétricas das fibras e da matriz, o valor médio da deformação de todos os Corpos de Prova ensaiados por Reis (2013), foi de 0,00854 mm/mm. O menor teor de fibras ensaiado em seu trabalho também foi de 40% (m/m), para compósitos de fibras longas em matriz de resina epóxi e nele a tensão variou entre 147,6 e 159,8 MPa e o Módulo de Elasticidade variou entre 15,2 e 16,4 GPa.

Para os compósitos de fibras longas em matriz de resina epóxi, tratadas quimicamente, de 280 mm e teor de fibras de 60% (m/m) Reis (2013), obteve valores de Tensão de Flexão entre 188 e 193 MPa e valores de Módulo de Elasticidade em torno de 20,5 GPa. Para compósitos de fibras curtas na mesma matriz, também tratadas quimicamente, de 25 mm, com teor de fibras de 60% (m/m), foram apresentados, no mesmo trabalho, valores obtidos de 91,9 MPa de Tensão de Flexão e 8,3 GPa de Módulo de Elasticidade.

2.5 COMPÓSITOS DE MATRIZES DE RESINA EPÓXI REFORÇADAS COM FIBRAS VEGETAIS, COMO ALTERNATIVA PARA MADEIRA, EM APLICAÇÕES DE ENGENHARIA FERROVIÁRIA

Dormente é o elemento da superestrutura ferroviária que tem por função, receber e transmitir ao lastro os esforços produzidos pelas cargas dos veículos, servindo como suporte dos trilhos, permitindo sua fixação e mantendo invariável a distância entre eles (bitola). Segundo Brina (1979), o dormente necessita atender às seguintes exigências: i) suas dimensões, no comprimento e na largura, devem fornecer uma superfície de apoio suficiente para que a taxa de trabalho no lastro não ultrapasse os limites relativos a este material; ii) sua espessura deve dar a necessária rigidez, permitindo entretanto alguma elasticidade; iii) ter suficiente resistência aos esforços solicitantes; iv) ter durabilidade; v) permitir, com relativa facilidade, o nivelamento do lastro (socaria), na sua base; vi) opor-se, eficazmente, aos deslocamentos longitudinais e transversais da via; vii) permitir uma boa fixação do trilho, isto é, uma fixação firme sem ser, excessivamente, rígida. Estima-se que são usados entre 1 650 a 2 000 dormentes por quilômetro de via férrea, dependendo da bitola e da finalidade a que se destine a via (para passageiros, carga ou mista). (TOGNO, 1968).

Os dormentes de madeira são os mais utilizados no mundo e cálculos mostram que 2 a 5% desses dormentes precisam ser renovados a cada ano. (MARZOLA, 2004). O Brasil possui em torno de 30 000 quilômetros de ferrovias, o que resultaria em, aproximadamente, 1 milhão de peças de dormentes a serem substituídos anualmente.

Embora outros materiais como o aço, concreto, plástico e borrachas sejam também usados para a confecção de dormentes, a madeira de eucalipto é a mais usada no Brasil desde 1949. (ANDRADE, 1961). A madeira de eucalipto tem crescimento rápido, apresenta densidade adequada à confecção de dormentes que custavam, em 2005/2006, entre R\$60,00 e R\$80,00 a unidade (*), apresentando ainda uma boa resistência a ataques de insetos e fungos. (ALVES; SINAY, 2005). No entanto, os dormentes de plástico, mesmo não podendo ser mais baratos que os de eucalipto, aumentariam a segurança das ferrovias, pois mesmo nas curvas, mantêm inalterada a bitola das vias porque não são suscetíveis a desprendimentos de placas de fixação e retêm as fixações, quaisquer que sejam elas. (FARIA; SINAY,

2006). Os dormentes plásticos podem ser usados inclusive em vias para trens de carga. (FARIA; SINAY, 2006; MARZOLA, 2004). Além da longa vida útil os dormentes de plástico, mostram-se vantajosos em comparação aos de madeira de eucalipto, pois estes necessitam de no mínimo 18 meses para poderem ser fabricados, já que este é o tempo mínimo para que uma árvore atinja tamanho adequado para o corte e desdobramento, enquanto que o dormente de plástico pode ficar pronto em cerca de 8 horas. (TIETEK, 2006, *apud* FARIA, 2006).

A Norma Brasileira ABNT NBR 7511:2013, preconiza em seu item 4.1.4 que os dormentes ferroviários, devem atender aos requisitos mínimos de desempenho estabelecidos em sua Tabela 1, avaliados com a madeira na faixa de teores de umidade entre 20% e 30%. Os respectivos métodos de ensaios constam nos anexos A a E, desta norma, sendo assim uma indicação para análises a serem feitas, futuramente, no material aqui pesquisado. Ainda segundo o que ela prescreve, os dormentes de madeira serrada devem possuir densidade de massa aparente mínima de 750 kgf/m³ e de 600 kgf/m³, para a primeira classe e segunda classe, respectivamente.

Tabela 1 – Valores mínimos de propriedades das madeiras e dos produtos de madeira para dormentes (madeira serrada, madeira laminada colada (MCL), “*parallel strand lumber*” (PSL) e laminado colado (LVL).

Propriedade e método de ensaio	Notação	Valor		Método de Verificação
		Primeira Classe	Segunda Classe	
Módulo de elasticidade à flexão	MOE	13 000 MPa	10 000 MPa	Anexo A
Módulo de ruptura à flexão	MOR	50 MPa	40 MPa	Anexo A
Compressão normal – Placa	F _{c90,P}	5 MPa	4 MPa	Anexo B
Resistência ao arrancamento lateral	R _{ao}	10 kN	8 kN	Anexo D
Resistência ao arrancamento normal	R _{a90}	225 kN	20 kN	Anexo C
Dureza Janka	f _H	40 MPa	35 MPa	Anexo E

Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7511,2013).

No caso de aplicação como Dormentes Ferroviários, por exemplo, aqueles de material polimérico contendo alto teor de reforço fibroso (40-80% m/m), exigiriam um processamento diferenciado que poderia ser desenvolvido a partir deste trabalho.

Assim, dependendo de resultados favoráveis obtidos nesta tese, poderia ser avaliado no futuro o comportamento de protótipos de dormentes de compósitos poliméricos obtidos, instrumentados, em situação real de serviço, em via férrea sujeita a tráfego pesado, em comparação com dormentes de eucalipto, também instrumentados e instalados em situação equivalente.

A economia pela utilização corrente de dormentes de plástico poderia chegar a R\$50.000,00/km, por ano (*), segundo estatísticas norte-americanas, país em que a utilização destes dormentes é relativamente bem difundida. Essa economia seria devida à longa vida útil do material, o que diminuiria os custos com manutenção de via e reposição de dormentes. Os dormentes de plástico poderiam ser instalados na via, com os mesmos equipamentos utilizados para a instalação dos dormentes de madeira. (TIETEK, 2006, *apud* FARIA, 2016).

Assim, a partir da presente pesquisa, poderá ser obtido um compósito polimérico para utilização como dormentes, entre outras aplicações estruturais, a serem definidas após a avaliação dos materiais obtidos.

Os materiais compósitos poliméricos vêm sendo pesquisados por muitos autores tendo em vista oferecerem facilidade de fabricação em larga escala e no caso do reforço com fibras vegetais, além de serem estas originadas de fonte renovável, trazerem vantagens adicionais tais como baixo custo, bom desempenho mecânico, facilidade de obtenção, ausência de abrasividade aos equipamentos utilizados em seu processamento, não toxicidade ao meio ambiente e ao ser humano, biodegradabilidade da fibra e no caso da fibra de taquara, a boa compatibilidade com a resina epóxi.

Observa-se que Reis (2013) concluiu em seu trabalho:

Os valores de tensão de flexão mínima e módulos de elasticidade dos compósitos com fibras longas e alinhadas são superiores a todos os valores comparados aos das madeiras, no entanto, o problema de utilizar esses compósitos na fabricação de dormentes é a característica da anisotropia, pois eventualmente pode ocorrer a propagação de trincas e fissuras quando fixado nos trilhos com parafusos. (REIS, 2013).

(*) Os valores citados, em Reais, podem, sem embargo, serem atualizados pela cotação do Dolar Americano (US\$1,00 = R\$2,274 – janeiro/2006)

3 ABORDAGEM TEÓRICA

3.1 DEFINIÇÕES DE INTERESSE

Tendo em vista o assunto abordado neste trabalho é interessante revisar-se algumas definições básicas que se tornam úteis para a compreensão do problema:

a. Elasticidade

Segundo Lacerda (1964), elasticidade é a propriedade que têm os corpos, de armazenar, sob a forma de energia potencial interna, o trabalho mecânico de deformação provocado pela solicitação externa devolvendo, total ou parcialmente, essa energia sob a forma de trabalho mecânico, quando desaparece a causa da deformação.

b. Módulo de Elasticidade Longitudinal ou Módulo de Young

b.1. Corpo elástico

Esta expressão é empregada para designar corpos que para todos os efeitos, se comportam como perfeitamente elásticos, isto é, são aqueles que voltam, praticamente, ao estado primitivo quando retirada a solicitação que causava sua deformação que assim desapareceria, por completo.

b.2. Limite de elasticidade

É a tensão além da qual o material começa a apresentar resíduos de deformação que não podem ser desprezados.

b.3. Lei de Hooke

A toda tensão aplicada a um corpo corresponde uma deformação proporcional, enquanto o mesmo estiver em seu estado elástico:

$$\sigma \sim \varepsilon \quad (1)$$

$\varepsilon \rightarrow$ Deformação específica;

$$\varepsilon = \alpha \cdot \sigma \quad (2)$$

onde:

$\alpha \rightarrow$ Coeficiente de proporcionalidade ou coeficiente de “*souplesse*”;

$$\alpha = \frac{1}{E} \quad (3)$$

$\sigma \rightarrow$ Tensão aplicada;

$$\sigma = \frac{P}{S} \quad (4)$$

$E \rightarrow$ Coeficiente ou Módulo de Elasticidade Longitudinal ou Módulo de Young.

Assim:

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \cdot \frac{P}{S} \quad (5)$$

que é a expressão que define a Lei de Hooke.

Desta forma também pode-se escrever que:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (6)$$

e também que:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \therefore E = \frac{P}{\varepsilon \cdot S} \quad (7)$$

Em última análise o Módulo de Elasticidade Longitudinal ou Módulo de Young, caracteriza a habilidade que tem um material, em determinadas condições de solicitação, de restituir em forma de energia mecânica, a energia potencial

armazenada com o trabalho de deformação elástica. Em outras palavras: caracteriza a habilidade do material, de recuperar a forma que possuía anteriormente à aplicação dos esforços que provocaram a deformação elástica. Quanto maior o Módulo de Elasticidade, maior a capacidade de recuperação da deformação elástica de um corpo.

Considerando uma tensão aplicada constante, em determinadas condições de comparação de materiais diversos: se ε aumenta, então E diminui e se ε diminui, então E aumenta.

c. Coeficiente e Módulo de Poisson

Em vista de sua concorrência como dado, em simulações a serem efetuadas pelo Método dos Elementos Finitos, na sequência desse trabalho, é também interessante definir aqui o Coeficiente de Poisson (ν) e o Módulo de Poisson ($\frac{1}{m}$).

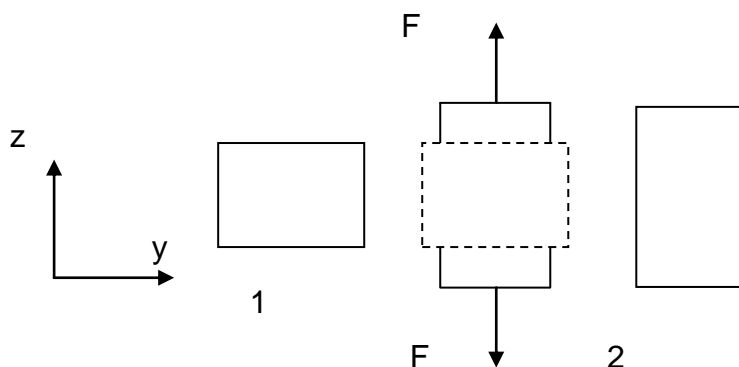
Considerando-se como representado na Figura 5, a variação (redução) da seção transversal de um corpo que esteja sendo submetido a um esforço de tração, perpendicular a esta seção, tem-se:

$$\frac{1}{m} = \nu \quad (8)$$

onde:

$\nu \rightarrow$ Coeficiente de proporcionalidade ou Módulo de Poisson.

Figura 5 – Esquema representativo das deformações de um corpo submetido a um esforço de tração



Fonte: Adaptado de (MARTINS, 2010).

O Módulo de Poisson é uma constante elástica que traduz a proporcionalidade entre a deformação numa direção e a deformação aplicada em outra direção que lhe seja perpendicular.

Não havendo perda de material, se uma dimensão aumenta em uma direção, reduz-se a dimensão perpendicular do corpo ficando, assim, este módulo com sinal contrário:

$$- \nu = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon} \therefore \varepsilon_t = -\nu \cdot \varepsilon \quad (9)$$

Considerando que

$$\nu = \frac{1}{m} \quad \text{e} \quad \varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

$$\therefore -\nu = \frac{\varepsilon_t \cdot E}{\sigma} \quad \therefore \varepsilon_t = \frac{1}{m} \cdot \frac{\sigma}{E} \quad (10)$$

onde ε_t é chamada de “Deformação Específica Transversal”.

Por esta expressão percebe-se que quando $\nu = \frac{1}{m}$ cresce, então ε_t também aumenta se $\frac{\sigma}{E}$ se mantiver inalterado.

Também, se E aumenta e mantendo-se ν inalterado, pode-se esperar que ε_t diminua.

Quanto mais deformável for o material no sentido transversal ao esforço, menor deverá ser o valor de m (Coeficiente de Poisson) e portanto, maior o valor de ν , (Módulo de Poisson).

No caso de materiais não isotrópicos, como a madeira, o Módulo de Poisson depende da direção em que estes são alongados.

Martins (2010) apresenta um quadro de valores indicativos de Módulos de Poisson para algumas espécies de madeira, a 12% de teor de umidade, reproduzido na Tabela 2:

Tabela 2 – Valores indicativos de Módulo de Poisson

Espécie	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{TR}
Carvalho	0,37	0,43	0,62
Mogno	0,30	0,64	0,60
Pinho	0,34	0,40	0,43

Fonte: (MARTINS, 2010).

Observação: O primeiro índice é referente à direção em que é aplicada a tensão e o segundo a direção em que é medida a deformação transversal. A letra **L** corresponde à direção longitudinal, **R** à direção radial e **T** à direção tangencial. No trabalho que se desenvolverá (simulações pelo Método dos Elementos Finitos) é preponderante a composição longitudinal/radial.

Em complementação, como ilustração, pode-se acrescentar que segundo Lacerda (1964):

Poisson concluiu ser m constante e igual a 4, para todos os materiais, o que não é verdade. O valor de m fica compreendido entre 3 e 4 para corpos comuns e é 10/3 para os metais dúcteis, de modo aproximado. Para o aço doce m varia de 3,3 a 3,5. Com o aumento da temperatura, m decresce e se aproxima de 2, no limite de fusão, podendo ser considerado igual a 2, para os líquidos (indeformáveis). Para os concretos o valor de m vai de 6 a 7. (LACERDA, 1964).

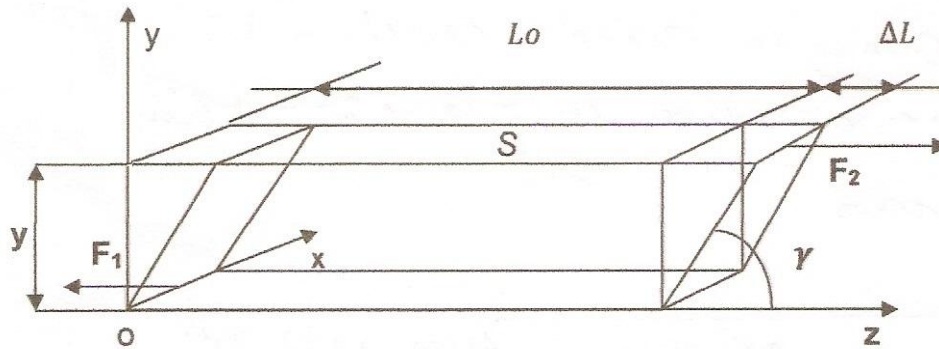
Também é interessante lembrar que E (Módulo de Elasticidade) e ν (Módulo de Poisson) devem ser considerados como, características intrínsecas de um determinado material ensaiado em condições padrão.

d. Módulo de Cisalhamento

O significado físico do Módulo de Cisalhamento está intimamente relacionado com a rigidez à deformação angular.

Na Figura 6 esquematiza-se um corpo de prova em que atuam as forças F_1 e F_2 que provocam uma deformação angular γ . Esta força é chamada de força de cisalhamento, porquanto introduz tensões de corte e também uma deformação angular característica.

Figura 6 – Esquema de corpo de prova submetido a esforço cisalhante.



Adaptado de: (MARTINS, 2010).

A tensão cisalhante τ_{zy} , num plano **zy** é dada por:

$$\tau_{zy} = \frac{F}{S} \quad (11)$$

onde **S** é a superfície sujeita ao cisalhamento.

A deformação angular é dada por γ e é definida por:

$$\gamma = \frac{\Delta L}{y} \quad (12)$$

Pela Lei de Hooke, a deformação ΔL é proporcional à força **F**, multiplicada por uma constante α :

$$F = \alpha \cdot \Delta L \quad (13)$$

$$\tau_{zy} = \left(\frac{\alpha \cdot y}{S} \right) \cdot \gamma \quad (14)$$

Mas, $\left(\frac{\alpha \cdot y}{S} \right)$ é também uma constante independente da tensão cisalhante e da deformação angular e assim, pode-se definir como Módulo de Cisalhamento:

$$G_{zy} = \frac{\tau_{zy}}{\gamma} \quad (15)$$

3.2 JUSTIFICATIVA TEÓRICA

3.2.1 Introdução

Neste trabalho são estudados compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras vegetais, sendo interessante uma breve revisão sobre o assunto.

Segundo Callister (2008), compósito é um material obtido pela mistura íntima de dois ou mais materiais, sendo um deles o que tem a função de envolver ou aglutinar os demais, resultando disso um material que supera as características físicas e mecânicas de um deles (matriz), acrescentando-lhe parte das características dos materiais agregados.

Assim, são os compósitos formados, basicamente, em duas fases: a fase matriz e a fase dispersa.

Os compósitos estão divididos segundo a natureza da fase dispersa, em: compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras e compósitos estruturais.

Partículas são os dispersos caracterizados por possuírem três eixos de dimensões semelhantes. Fibras são os dispersos em que uma das dimensões é muito maior que as outras duas e Estruturais são combinações de compósitos de materiais homogêneos.

Compósitos reforçados com fibras são considerados os de melhor comportamento mecânico e atingem com frequência, resistência e ou rigidez altas, em relação ao seu peso próprio.

A previsão das propriedades mecânicas de compósitos reforçados com fibras, sejam minerais ou orgânicas é, segundo Folkes (1985), um problema de difícil solução matemática, principalmente, quando o esforço não é aplicado ao longo do eixo das fibras, pois assim as fibras não podem ser consideradas como se tivessem comprimentos infinitos.

Um elemento compósito, reforçado com fibras, mostra distribuição complexa em termos de orientação das fibras, variando inclusive de ponto a ponto, neste elemento.

Assim, de acordo com Folkes (1985), qualquer trabalho que pretenda ser realista deve analisar o efeito do comprimento das fibras, sua distribuição e sua orientação com relação à direção de aplicação dos esforços.

Um material é dito anisotrópico se suas propriedades dependem da direção em que são medidas. Assim, compósitos em que haja grande alinhamento de fibras em relação a uma determinada direção, terão, provavelmente, módulo de elasticidade muito maior nesta mesma direção.

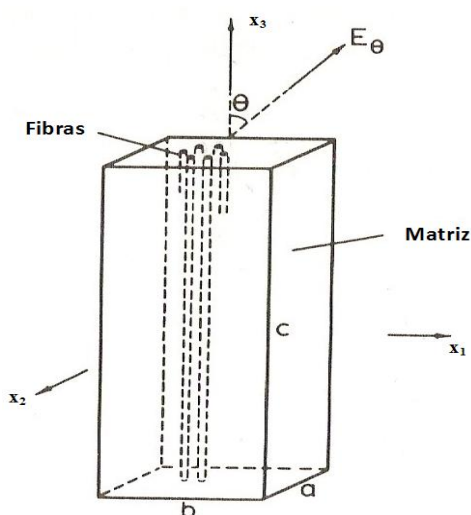
A rigidez de um compósito é caracterizada, em princípio, pelo Módulo de Young sendo então necessário examinar a forma pelo qual este valor depende das propriedades da fibra, da matriz e do comprimento da fibra.

3.2.2 Anisotropia das propriedades mecânicas

Como já foi citado, um material é dito anisotrópico se suas propriedades são função da direção em que são medidas, devendo estas direções, serem tomadas em relação a eixos determinados.

Segundo Folkes (1985), para caracterizar-se a anisotropia de um compósito seria necessário um conjunto de medidas segundo uma escala de ângulos variando entre $0 < \Theta < 90^\circ$. A Figura 7 mostra, esquematicamente, a definição dos eixos, para descrição da anisotropia mecânica.

Figura 7 – Definição de eixos para descrição da Anisotropia Mecânica



Fonte: (FOLKES, 1985).

Para resistência ou rigidez isto é verdadeiro, mas se for visto apenas o comportamento elástico, a variação da rigidez com o ângulo Θ , segundo o mesmo autor, segue a seguinte relação:

$$\frac{1}{E_{\theta}} = S_{33} \cos^4 \theta + (2 S_{13} + S_{44}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta + S_{11} \sin^4 \theta \quad (16)$$

onde: E_{θ} é medido em relação a um ângulo Θ , com relação a x_3 ;

S_{iv} são constantes relativas às propriedades mais comuns dos compósitos:

$$S_{33} = \frac{1}{E_0}$$

$$S_{11} = \frac{1}{E_{90}}$$

$$S_{44} = \frac{1}{G}$$

G é o Módulo de cisalhamento longitudinal;

S_{13} é fornecido pelo Módulo de Poisson;

$$\nu_{13} = \frac{S_{13}}{S_{11}} = \frac{\text{deformação transversal, em relação a } x_3}{\text{deformação longitudinal, em relação a } x_1}$$

ν_{13} é um fator muito pequeno, pois a deformação transversal, em relação a x_3 é contida pela ação das fibras e

E_{θ} será, realmente, definido se forem conhecidos os valores de E_{90} e G .

Estes parâmetros podem ser obtidos experimentalmente ou previstos ou deduzidos a partir do conhecimento da rigidez da fibra e da matriz polimérica e da fração volumétrica de fibras no compósito.

O valor de E_0 é facilmente obtido e com boa precisão, para compósitos de fibras longas, sendo isso, no entanto, muito difícil no caso de fibras curtas.

E_{90} e G são de difícil obtenção em ambos os casos.

Prossegue Folkes (1985) afirmando que relacionar as propriedades elásticas de um sistema parcialmente orientado com as de sistemas completamente orientados exige a consideração de algumas hipóteses para tornar relacionável o estado de tensão e deformação através do compósito.

Ainda segundo Folkes (1985), um enfoque utilizado é a consideração de estado uniforme de deformações ou então por outro, se adota a consideração de um estado uniforme de tensões.

Várias simplificações podem ser feitas e a mais comum de todas é aquela em que se ignoram a rigidez transversal E_{90} e também o módulo de cisalhamento G , obtendo-se, então:

$$\frac{1}{E_{\theta}} = \frac{1}{E_0} \cos^4 \theta + 2S_{13} \sin^2 \theta \cos^2 \theta \quad (17)$$

3.2.3 Reforço usando fibras curtas

A rigidez de um compósito é primeiramente uma função de E_0 e assim é necessário examinar o modo pelo qual este valor é dependente das propriedades da fibra, da matriz e do comprimento das fibras.

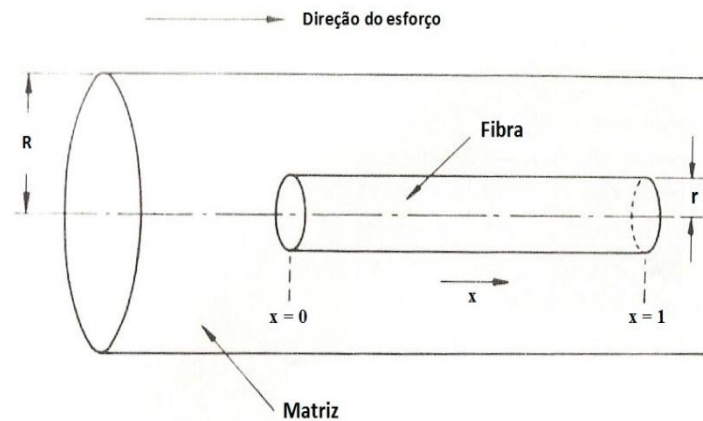
Quando uma força é aplicada na direção de anisotropia de um compósito de fibras totalmente alinhadas, a força se transfere para as fibras rígidas através da resistência ao cisalhamento na interface fibra-matriz.

O cálculo no caso de fibras elásticas e matriz elástica é proposto por Folkes, (1985):

Hipótese:

A matriz como um todo está submetida a deformação homogênea causada por uma força aplicada paralelamente às fibras (Figura 8).

Figura 8 – Esquema Ilustrativo de Cisalhamento Fibra-Matriz.



Fonte: (FOLKES, 1985).

∂F – É equilibrada pela força de cisalhamento na interface fibra-matriz.

$$\partial F = \tau 2\pi r \partial x$$

Ou

$$\frac{\partial F}{\partial x} = 2\pi r \tau \quad (18)$$

onde:

τ - tensão cisalhante que vai ao longo da fibra.

Mas,

$$\tau \sim \gamma$$

γ - tensão cisalhante desenvolvida na interface fibra-matriz.

Sendo γ proporcional à diferença entre o deslocamento elástico u , de uma fibra em um ponto qualquer x em uma extremidade e o deslocamento elástico v da matriz, no mesmo ponto, pode-se escrever:

$$\frac{dF}{dx} = H(u - v) \quad (19)$$

onde:

H - constante para determinado compósito.

Da Lei de Hooke:

$$F = E_f \cdot A_f \frac{du}{dx} \quad (20)$$

onde:

E_f - Módulo de Young;

A_f - Área da seção da fibra;

Diferenciando (19), em relação a x , tem-se:

$$\frac{d^2 F}{dx^2} = H \left(\frac{du}{dx} - \frac{dv}{dx} \right)$$

Mas, de (20):

$$\frac{du}{dx} = \frac{F}{E_f A_f}, \text{ se } \frac{dv}{dx} = \text{deformação na matriz.}$$

Assim:

$$\frac{d^2 F}{dx^2} = H \left(\frac{F}{E_f A_f} - \varepsilon \right)$$

que é uma equação diferencial com solução da forma

$$F = E_f A_f \varepsilon + B \sinh \beta x + C \cosh \beta x$$

onde:

$$\beta = \left(\frac{H}{E_f A_f} \right)^{\frac{1}{2}}$$

B e C são constantes de integração, cujos valores podem ser determinados estabelecendo-se as condições de contorno, pelas quais não exista transferência de carga através das faces das extremidades das fibras, ou seja, que $F = 0$, em $x = 0$ e em $x = \ell$

Assim:

$$\sigma_f = \frac{F}{A_f} = E_f \varepsilon \left\{ 1 - \frac{\cosh \beta \left(\frac{l}{2} - x \right)}{\cosh \beta \frac{l}{2}} \right\} \quad (21)$$

A tensão média desenvolvida ao longo da fibra será dada por:

$$\sigma_f = E_f \varepsilon \left\{ 1 - \frac{\tanh \beta \frac{l}{2}}{\beta \frac{l}{2}} \right\} \quad (22)$$

A tensão longitudinal média em um compósito que contenha uma fração volumétrica ϑ de fibras pode ser calculada pela média ponderada das tensões desenvolvidas, separadamente, por fibras e matriz, através da expressão:

$$\sigma_o = \vartheta \sigma_f + (1 - \vartheta) \sigma_m \quad (23)$$

onde:

σ_m - Tensão desenvolvida na matriz e

σ_f - Tensão desenvolvida na fibra.

$$\text{Mas, } \sigma_m = E_m \varepsilon$$

onde:

E_m - Módulo de elasticidade da matriz.

Assim:

$$\sigma_o = \vartheta E_f \varepsilon \left\{ 1 - \frac{\tanh \beta \frac{l}{2}}{\beta \frac{l}{2}} \right\} + (1 - \vartheta) E_m \varepsilon \quad (24)$$

Mas,

$$E_o = \frac{\sigma_o}{\varepsilon} = \vartheta E_f \left\{ 1 - \frac{\tanh \beta \frac{l}{2}}{\beta \frac{l}{2}} \right\} + (1 - \vartheta) E_m \quad (25)$$

Sendo R , a distância entre eixos de fibras e r , o raio das fibras e ainda:

$$H = 2\pi \frac{G_m}{\ln \frac{R}{r}} \quad (26)$$

onde:

G_m - Módulo de cisalhamento da matriz e

$$\beta = \left\{ \frac{2\pi G_m}{E_f A_f \ln \frac{R}{r}} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

onde, R e r são funções da fração volumétrica de fibras e

$$\vartheta = \frac{2\pi r^2}{\sqrt{3R^2}} \quad (28)$$

(para fibras arrumadas em arranjos hexagonais).

As equações de Folkes, (1995) mostram que para um dado compósito o valor de β pode ser obtido se forem; dados: G_f ; E_f ; A_f e ϑ . A magnitude de β determina a “escala” de dependência de E_0 em relação ao comprimento “ ℓ ” da fibra, isto é, deve afetar, diretamente, o comprimento necessário para fornecer um valor de E_0 próximo do que se espera para a fibra de comprimento “infinito”.

3.3 A APLICAÇÃO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS VEGETAIS EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS TIPO SANDUÍCHE

3.3.1 Introdução

No presente trabalho desenvolve-se um estudo, utilizando compósitos de epóxi e taquara-lixá, para a construção de um elemento estrutural em forma de viga-sanduíche, simulando também seu comportamento como viga submetida a um ensaio à flexão de três pontos. Este estudo foi feito, principalmente, para aferição dos resultados obtidos com a aplicação dos métodos de determinação das características mecânicas, propostos, mas, tiveram no entanto o condão de demonstrar as excelentes perspectivas para sua utilização como material estrutural de engenharia.

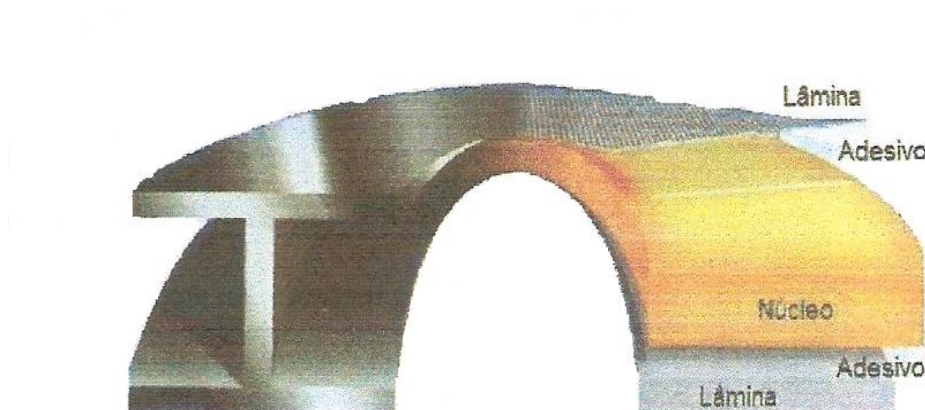
A ASTM - American Society for Testing and Materials define uma estrutura sanduíche, como sendo uma forma especial de composto laminado compreendendo uma combinação de materiais diferentes colados entre si de forma a utilizar as propriedades de cada um deles para obter uma vantagem estrutural para o conjunto.

De modo geral as vigas-sanduiche são construídas utilizando-se duas lâminas de pequena espessura de um material mais resistente separadas por uma camada espessa composta por um material menos resistente. Os três elementos devem ser firmemente colados entre si.

3.3.2 Comportamento mecânico de um sistema estrutural em Sanduíche

Um sistema estrutural em “sanduíche” pode ser assemelhado a uma viga de perfil em “I”, em que as lâminas funcionam como os banzos inferior e superior, suportando os esforços de tração e compressão, funcionando, por sua vez, o núcleo como a alma do perfil, o qual suportaria os esforços cisalhantes e garantiria também, o espaçamento entre elas (Figura 9).

Figura 9 – Desenho alegórico representando o funcionamento de uma viga-sanduiche.



Fonte: (ALMEIDA, 2009).

No sistema “sanduiche”, assim como em um perfil “I”, a rigidez de flexão ou rigidez flexional D aumenta com a espessura (ou altura) do núcleo ou alma e é dada pela equação:

$$D = E \cdot I \quad (29)$$

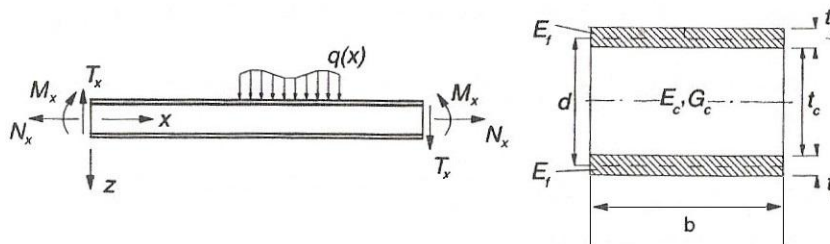
onde E é o Módulo de Elasticidade do material e I é o Momento de Inércia da seção reta do elemento analisado.

É importante ressaltar que o conceito de Módulo de Elasticidade Global não pode ser aplicado para um material não homogêneo já que E é variável na direção da flexão e por isso a única característica mecânica que prevalece no caso da viga-sanduiche é a Rigidez Flexional

Em uma viga sanduiche, a rigidez à flexão ou flexional é dada pela soma das rigidezes dos seus elementos constituintes (lâminas ou faces e alma ou núcleo). (ZENKERT, 1995; ORESTEN, 2003; ALMEIDA, 2009).

A Figura 10 mostra a representação de uma viga-sanduiche em perfil e em corte com a convenção de sinais de momentos, esforços cortantes e axiais e a nomenclatura de suas dimensões principais.

Figura 10 – Esquema de uma viga-sanduiche e convenção de sinais.



Adaptado de: (ZENKERT, 1995).

Considerando-se agora, os Módulos de Elasticidade e as espessuras das faces e do núcleo de um sistema estrutural em sanduíche, pode-se escrever:

$$D = \frac{E_f b t_f^3}{6} + \frac{E_f b t_f d^2}{2} + \frac{E_c b t_c^3}{12} \quad (30)$$

onde:

D – rigidez flexional da viga;

E_f – módulo de elasticidade do material das faces ou lâminas;

E_c – módulo de elasticidade do material do núcleo;

t_f – espessura das faces ou lâminas;

t_c – espessura do núcleo;

b – largura da seção reta;

d – distância entre os centros das faces ou lâminas.

Nessa expressão o primeiro termo corresponde à rigidez de flexão das lâminas ou faces, segundo seus próprios eixos de inércia e o segundo termo corresponde à transmissão da rigidez para o eixo da seção. O terceiro termo corresponde à rigidez flexional do núcleo segundo o eixo da seção.

Segundo Zenkert (1995), as faces devem ter espessura pequena, em relação ao núcleo ($t_f \ll t_c$) e o primeiro termo da equação representaria assim, menos de 1% do valor do segundo.

$$3 \left(\frac{d}{t_f} \right)^2 > 100 \text{ ou } \frac{d}{t_f} > 5,77 \quad (31)$$

Pela própria escolha dos materiais, o material do núcleo, normalmente, teria módulo de elasticidade muito menor que o da face ficando o terceiro termo valendo também, menos que 1% do segundo:

$$\frac{6E_f t_f d^2}{E_c t_c^3} > 100 \quad (32)$$

Assim, sendo uma estrutura sanduíche com faces finas ($t_f \ll t_c$) e com um núcleo pouco resistente ($E_c \ll E_f$) e ainda, considerando-se unitária a largura da base, então sua rigidez flexional, poderia ser dada, aproximadamente, por:

$$D = \frac{E_f t_f d^2}{2} \quad (33)$$

De acordo com Oresten (2003), para materiais de engenharia utilizados rotineiramente em estruturas núcleo/face, a relação de rigidez à flexão está, comumente, entre 10 e 50 e a relação entre os módulos elásticos face/núcleo, entre 50 e 1000, em valores absolutos.

O termo dominante da rigidez flexional é o que trata da flexão das faces em torno da linha neutra da estrutura como um todo e caracteriza as solicitações por tração-compressão das faces.

É também, fundamental que possa ser considerada a perfeita adesão entre as lâminas e núcleo para que se aproveite o “efeito sanduiche”. Em caso contrário

predominarão o primeiro e o terceiro termos da equação, perdendo-se o citado efeito estrutural.

Neste trabalho pretende-se aferir os resultados de deformações em um experimento com um espécimen em forma de viga sanduíche, através de uma simulação computacional pelo Método dos Elementos Finitos, em que se adotarão resultados de ensaios laboratoriais que permitem o cálculo simultâneo dos módulos de elasticidade e de cisalhamento de compósitos de matriz de epóxi reforçada com fibras de taquara-lixá.

3.4 CONCLUSÃO

A utilização de fibras de vegetais como taquara-lixá (*Merostachys skvortzovii* Sendulsky) longas e curtas como reforço em materiais compósitos de matriz polimérica e sua aplicação em elementos estruturais como vigas-sanduíche, encontra como foi visto, respaldo teórico e é de se esperar que por suas características mecânicas de resistência, semelhante em muitos casos a materiais de uso tradicional como aço, aramidas e outros plásticos de engenharia, possa pelo que se acaba de expor, apresentar resultados interessantes do ponto de vista das engenharias, porquanto é previsível que suas propriedades mecânicas combinadas alcancem ou mesmo superem aquelas de materiais de uso convencional, como madeiras de eucalipto e outras, em aplicações correntes como a fabricação de dormentes ferroviários, assim como de diferentes elementos estruturais.

O procedimento experimental que se desenvolve a seguir, tem como objetivo avaliar métodos de cálculo de propriedades mecânicas de compósitos artificiais e avaliar a sua utilização, confirmando estas expectativas.

4 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 INTRODUÇÃO

A parte experimental deste trabalho teve como enfoque, a execução de ensaios de flexão de três pontos em amostras de compósitos de matriz de resina epóxi reforçada com fibras vegetais visando, inicialmente, a avaliação de métodos utilizados na determinação de características mecânicas de materiais compósitos tendo em vista que não é pacífica a aceitação de alguns dos métodos normatizados, porquanto não são os mesmos, muitas vezes desenvolvidos especificamente para análise de materiais artificiais.

Além disso, serão apresentados ensaios de flexão de três pontos em compósitos associados em forma de viga-sanduiche e cujos materiais constituintes serão os mesmos ensaiados nas partes antecedentes do trabalho.

Assim sendo serão, como de praxe, descritos os materiais utilizados no trabalho, equipamentos empregados, mas como se atuava em uma linha de pesquisa já em andamento com alguns trabalhos finalizados, lançou-se mão, também, de resultados de caracterização já obtidos, anteriormente, por pesquisadores do mesmo grupo, para os materiais semelhantes. (ALVES JUNIOR, 2012; REIS, 2013; FREDIANELLI, 2013).

Ainda como parte complementar deste trabalho, como era proposto, foram preparados na sequência, mais quatro blocos de compósitos e feitos novos ensaios, especificamente, visando confirmação de alguns dos resultados para a variedade do material utilizado (fibras sem tratamento), compósitos estes de matrizes de resina epóxi de outra procedência, reforçados com fibras de taquara-lixo preparadas ainda conforme o processo desenvolvido em Joinville/SC, mas com diferentes teores de fibras, diferentes comprimentos e diferentes disposições na moldagem.

Neste trabalho, decidiu-se caracterizar fisicamente os compósitos desenvolvidos, tendo em vista seu conhecimento ser necessário para a informação de dados em aplicativos de simulação numérica e para isto pesquisou-se entre as normas técnicas relacionadas com ensaios de compósitos e madeiras aquelas que apresentassem métodos que tornassem possível esta caracterização física, levando

ao cálculo dos Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento e permitindo determinar tensões e deslocamentos em ensaios laboratoriais.

Foram consideradas desta forma as seguintes normas técnicas que tratam de caracterização de amostras de materiais através de Ensaio de Flexão de Três e de Quatro Pontos, disponíveis:

1. Norma NBR 7190:2012; Projetos de Estruturas de Madeira, ABNT/CB-02 – Associação Brasileira de Normas Técnicas;
2. ASTM D198 – 2013; Standard Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes. – American Society for Testing and Materials;
3. ASTM D790 – 2010; Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials – American Society for Testing and Materials;
4. ASTM D7264/D7264 M – 2007; Standard Test Methods for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials – American Society for Testing and Materials.

Cabem aqui, os seguintes comentários:

- a) A norma NBR 7190:2012 é voltada para o estudo de peças estruturais de madeira. Propõe ensaios de flexão de três pontos, de características destrutivas em corpos de prova de grandes dimensões (105 x 5 x 5 cm) e razão $L \geq 21 h$ (L - distância entre apoios e h – altura da seção reta retangular);
- b) A norma ASTM D790 – 2010 é voltada para polímeros reforçados ou não reforçados. Propõe ensaios de flexão de três pontos, de características destrutivas em corpos de prova de pequenas dimensões (até 280 mm de comprimento) e razão $L \geq 16 h$;
- c) A norma ASTM D198 – 2013 é voltada para madeira bruta em dimensões estruturais. Propõe ensaios de flexão de três e quatro pontos, de características não destrutivas e permite a determinação concomitante dos módulos de elasticidade e de cisalhamento e razão $L \geq 12 h$;
- d) A norma ASTM D7264/D7264M – 2007 é voltada para polímeros e compósitos poliméricos. Propõe ensaios de flexão de três pontos, de características destrutivas em corpos de prova de pequenas dimensões (128 x 13 x 4 mm) e razão $L \geq 32 h$;

- e) Em vista das limitações de recursos financeiros existentes, optou-se nesta linha de pesquisa por trabalhar-se com amostras de pequenas dimensões, sendo a norma ASTM D790 – 2010 aquela considerada mais apropriada no início das pesquisas, sendo assim, em função disso, dimensionado e construído o molde de aço, utilizado para a confecção dos blocos de corpos de prova até o presente momento.

4.2 MATERIAIS

4.2.1 Matriz polimérica

Os compósitos desenvolvidos e ensaiados, nas três primeiras etapas da primeira parte deste trabalho, foram elaborados, com resina epóxi da marca Araldite GY 251 BR, fabricada por Huntsman Advanced Materials, com iniciador Aradur 956-2, aplicado na proporção de 15%, tendo esta resina o tempo de gel de aproximadamente 80 minutos. (Os materiais e métodos utilizados na segunda parte serão descritos oportunamente).

4.2.2 Fibras vegetais utilizadas

As fibras vegetais utilizadas neste trabalho foram extraídas da planta vulgarmente conhecida como taquara-lixá (*Merostachys skvortzovii* Sendulsky.), colhida na região serrana de São Bento do Sul/SC, entre os dias 11 e 18 de outubro de 2013, portanto entre as fases lunares de Quarto Crescente e Cheia, na estação da Primavera que nessa região, tem perfil chuvoso. O material vegetal teve seu processamento iniciado ainda “*in natura*” (Figura 11).

Figura 11 – Taquara-lixá “*in natura*”.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

4.3 EQUIPAMENTOS DE LABORATÓRIO

4.3.1 Balanças

Para pesagem da resina e agente de cura foi utilizada uma balança de precisão Shimadzu, modelo BL3200H, com precisão de 0,0001 g e capacidade máxima de 200 g. Para pesagem de colmos gravetos fibras e compósitos utilizou-se uma balança portátil com precisão de 0,1 g e capacidade máxima de 5,0 kg. Para determinação do índice de absorção de água dos compósitos foi utilizada uma balança eletrônica marca BIOPRECISA, modelo FA2104N, com precisão de leitura de 0,1 (mg), repetitividade/desvio padrão de 0,0002 (g) e erro linear de 0,0005 (g).

4.3.2 Estufa

A Estufa utilizada para a secagem dos colmos, secagem das fibras e pós-cura dos compósitos era da marca Quimis, modelo Q819V2 e para obtenção dos índices de absorção de água dos compósitos foi usada uma estufa microprocessada de secagem com “*timer*” marca CALLMEX, com temperatura mínima de 50 °C e precisão do sistema de ± 5 °C.

4.3.3 Calandra

Foi utilizada neste trabalho, uma calandra, especialmente desenvolvida no laboratório de Polímeros da UDESC/Joinville, para a preparação do material vegetal aplicado (Figura 12).

Figura 12 - Calandra desenvolvida na UDESC/Joinville.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

4.3.4 Molde

Foi utilizado um molde de aço, 280 x 50 x 60 mm, desenvolvido no Laboratório de Polímeros da UDESC/Joinville, projetado e dimensionado para atender a Linha de Pesquisa em pauta. Este molde possui uma tampa conectada com uma chapa móvel com dois pinos para a compressão dos compósitos (Figura 13).

Figura 13 – Molde de Aço para blocos de compósitos, desenvolvido na UDESC/Joinville.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

4.3.5 Máquina Universal de ensaios

Os ensaios de tração nas três etapas da Primeira Parte do trabalho, foram realizados em máquina Universal EMIC DL30000 com célula de carga 1 000 N e velocidade variável conforme o ensaio a ser executado (Figura 14).

Figura 14 – Máquina Universal EMIC DL30000 da UDESC/Joinville e detalhe do posicionamento dos apoios e célula de carga.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

4.3.6 Prensa para preparo dos compósitos

Nas três primeiras etapas, para a preparação dos compósitos por compressão, foi utilizada uma prensa hidráulica, com capacidade de até 50 tf, capaz de manter a pressão aplicada por períodos maiores do que 24 horas (Figura 39).

4.3.7 Microscópio Óptico

Foi utilizado um microscópio óptico da marca Olympus SZX7 com objetiva DF PLAPO 1X⁻⁴, para efetuar a caracterização por imagem, das fibras de taquara-lixá.

4.3.8 Deflectômetro eletrônico

Utilizou-se um deflectômetro eletrônico EMIC EE05, para medição de pequenas deformações, em corpos de prova submetidos a flexão ou compressão, com braço sensor em “*cantilever*”, com resolução de 0,001 mm, para deformação máxima de 12,5 mm, acoplado ao programa de leitura de dados da Máquina Universal EMIC DL 30000 (Figura 15).

Figura 15 - Deflectômetro acoplado à Máquina Universal de Ensaio e seu posicionamento.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

4.3.9 Destilador

Foi utilizado para o ensaio de absorção de água dos compósitos um destilador marca De Leo, modelo DL-DA, com capacidade de 5 litros.

4.3.10 Análise térmica

Um equipamento TGA – Balança termogravimétrica, fabricante NETZSCH, modelo TG – 209, em uma faixa de temperatura de 20 a 800 °C em atmosfera de nitrogênio, fluxo de 15 ml/min e taxa de aquecimento de 10 °C/min, foi utilizado para análise termogravimétrica.

4.3.11 FTIR

Um Espectrômetro de FTIR marca BOMEM, modelo MB 100, com 16 varreduras, resolução de 4 cm^{-1} usando pastilhas de KBr contendo a amostra de taquara-lixo em pó, foi utilizado para realizar a Análise de Espectrometria na Região do Infra-vermelho por Transformada de Fourier (FTIR).

4.3.12 Difratometria de Raios-X

As medidas para a taquara-lixo e compósitos foram realizadas usando um difratômetro marca Shimadzu XRD-7000, na configuração teta-teta, operando com radiação Cobre em 40 kV e 20 mA, com monocromador analisador.

4.4 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DA TAQUARA-LIXA

4.4.1 Caracterização por imagens micrográficas

A caracterização das fibras por imagens micrográficas foi feita com a utilização de um microscópio marca Olympus SZX7, com uma objetiva DF PLAPO 1X⁴. As imagens foram obtidas contra fundo escuro com iluminação direta de fonte incandescente.

4.4.2 Índice de Cristalinidade e Difratometria de Raios-X

Em geral, para medidas de difração de raios-x, as amostras a serem analisadas tem a forma de pó, isto é grãos da ordem de microns. Isto é perfeitamente possível para materiais que podem ser manipulados como minerais que podem ser macerados em uma peça de ágata. No entanto, no estudo de materiais metálicos ou fibrosos, a obtenção de materiais em forma de pó é em geral impossível e assim, costuma-se cortar esses materiais no tamanho menor possível.

O fato das amostras de taquara-lixo serem fibras, isto é, apresentarem estruturas que têm orientações preferenciais, o posicionamento destas amostras no suporte do difratômetro pode dar origem a difratogramas com padrões ligeiramente

diferentes. Como nesta tese objetiva-se fazer uma análise comparativa entre fibras submetidas a diferentes orientações e tratamentos, é importante uma padronização na preparação das amostras a serem medidas com difração. Assim, as amostras para as medidas de raios-x foram preparadas da seguinte forma:

1 - As fibras de taquara sem tratamento e a tratada com NaOH foram cortadas transversalmente com tesoura, de forma a ficar com o menor comprimento possível (operação manual). Isto resultou em fibras com comprimento menor do que 0,3 mm, as quais foram colocadas, randomicamente, no suporte de amostra com dimensões cilíndricas (30mm de diâmetro, 2,0 mm de espessura). O volume foi, ligeiramente, compactado no suporte de amostra, usando pressão exercida pelo operador;

2 - Em outra situação as fibras de comprimento em torno de 25 mm e diâmetros variáveis, típico das fibras vegetais, foram colocadas sobre o suporte de amostra vazado. As fibras foram dispostas perpendicularmente ao plano de difração, isto é, a direção das fibras foi sempre perpendicular ao plano definido pelo feixe incidente e difratados de raios X;

3 - No caso dos blocos de compósitos, como as fibras apresentam-se ligeiramente alinhadas, o bloco a ser medido foi posicionado no difratômetro com as fibras alinhadas ao eixo do difratômetro, isto é, com as fibras perpendiculares ao plano de difração no aparelho.

Difratogramas de raio-x de amostras de taquara-lixo e de compósitos taquara-lixo/epóxi foram feitos. O índice de cristalinidade da taquara-lixo foi calculado pelo método descrito por Segal (1959), através da razão entre as alturas da intensidade do pico cristalino ($I_{002} - I_{AM}$) e a intensidade total (I_{002}), após subtração do espalhamento do ar, com o uso do programa Orange (PARK *et al.*, 2010; SEGAL *et al.*, 1962; SEGAL; CONRAD, 1957; SEGAL *et al.*, 1959).

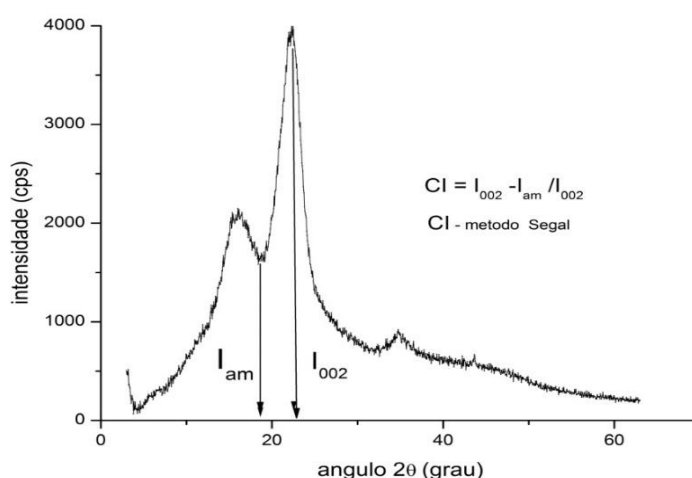
Assim, para estimar a cristalinidade das fibras de taquara-lixo foi empregada uma aproximação idealizada por Segal *et al.* (1959) que desenvolveu um método para a estimativa da cristalinidade em celulose nativa, dado pela Equação 34:

$$CI = \frac{[I_{002} - I_{AM}]}{I_{002}} \cdot 100\% \quad (34)$$

onde I_{002} é a Intensidade da linha mais importante que ocorre em torno de 22,7 grau e I_{Am} é a intensidade em torno de 18,0 grau, atribuída à parte amorfa da celulose.

Este método foi aplicado às medidas das amostras de taquara-lixo, conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Ilustração de Aplicação do Método de Segal *et al.* (1959).



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

4.4.3 Testes de Absorção de Água nos Compósitos

Os testes de absorção de água foram realizados de acordo com a Norma ASTM D 570 – 98, utilizando o teste de imersão em água pelo período de 24 horas. Primeiramente as amostras foram secas em estufa pelo período de 24 horas na temperatura de 50 °C, depois resfriadas em dessecador e então rapidamente pesadas (P_{seco}) em uma balança analítica com quatro casas de precisão. Após as pesagens, as amostras foram colocadas em um recipiente contendo água destilada à temperatura ambiente de, aproximadamente, 23 °C e mantidas totalmente imersas pelo período de 24 horas. Após o período de imersão, as amostras foram retiradas da água e suas superfícies foram enxugadas com auxílio de papel absorvente, para eliminar o excesso de água superficial sobre as amostras e então pesadas ($P_{saturado}$), novamente. As análises foram realizadas em cinco amostras para cada tipo de

compósito. Os valores apresentados são as médias dos valores calculados para todas as amostras, conforme o tipo de compósito.

Fórmula de cálculo (Equação 35):

$$h\% = \frac{P_{seco} - P_{saturado}}{P_{seco}} \cdot 100 \quad (35)$$

onde:

$h\%$ - Índice de absorção de água.

4.4.4 Composição Química

A análise da composição química da taquara-lixo foi realizada no Laboratório de Polpa e Papel da UFPR, do Departamento de Engenharia Industrial Madeireira, utilizando os procedimentos da Associação Técnica da Indústria de Polpa e Madeira – TAPPI. A amostragem e preparação do material para as análises utilizou os procedimentos T257-cm02 e a preparação do material para as análises químicas utilizou os procedimentos TAPPI T264-cm97. As Figuras 17 e 18 mostram respectivamente fotos da amostra geral e a amostra de taquara-lixo detalhada.

Figura 17 – Amostra Geral.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Figura 18 – Amostra detalhada da taquara-lixo.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

4.4.4.1 Determinação do teor de umidade

Foram pesadas amostras de taquara-lixo de aproximadamente 2 gf cada em béqueres tarados. As amostras ficaram em estufa com temperatura de 105 °C durante 24 horas. Após este período, as amostras foram retiradas da estufa e colocadas em dessecador para resfriar e evitar contato com a umidade do ar. As amostras foram novamente pesadas e pela diferença nas massas, foi encontrado o teor de umidade das fibras. A partir da Equação 36 calcula-se quanto de amostra seca há em uma massa conhecida de massa úmida, e os ensaios foram realizados em triplicata.

$$C = \frac{mS}{mU} \quad (36)$$

onde:

C = fator de correção de umidade.

mS = massa seca (g)

mU = massa úmida (g)

O método apresentado para determinação de umidade está descrito na norma TAPPI T550 om-03.

4.4.4.2 Determinação do teor de cinzas (Material Inorgânico)

Foram pesadas amostras de 5 gf para cada análise em cadinhos de porcelana previamente incinerados e tarados. As amostras foram levadas à mufla em temperatura de aproximadamente 525 °C por 3 horas. Os cadinhos foram removidos da mufla, deixados em dessecador até temperatura ambiente e depois pesados. O teor de cinzas foi calculado a partir da Equação 37, e os ensaios foram realizados em triplicata.

$$C(\%) = \frac{A}{B} \cdot 100 \quad (37)$$

onde:

$C(\%)$ = teor de cinzas em porcentagem.

A = massa de cinzas (g).

B = massa de amostra (g).

O método apresentado para determinação de cinzas está descrito na norma TAPPI T211 om-02. As Figuras 19 e 20 mostram etapas da determinação do teor de cinzas da taquara-lixá.

Figura 19 – Material inorgânico – entrada.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Figura 20 - Material inorgânico dentro da mufla.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

4.4.4.3 Solubilidade em água fria

Foram pesadas amostras de aproximadamente 2 gf cada e misturadas com 300 ml de água destilada e transferidas para béqueres de 400 ml. As amostras foram mantidas em temperatura ambiente por 48 horas com agitações frequentes. Após este período, o material foi transferido para um cadinho filtrante previamente tarado. O material foi lavado com água destilada, filtrado por sucção e depois levado para estufa para secagem a 105 °C. Depois as amostras foram retiradas da estufa e deixadas em dessecador até peso constante. O cálculo da solubilidade foi feito a partir da Equação 38, e as análises foram realizadas em triplicata.

$$\%E_f = \frac{(P - P_1)}{P} \cdot 100 \quad (38)$$

onde:

$\%E_f$ = porcentagem de produtos solúveis em água fria.

P = massa inicial da amostra (g).

P_1 = massa após o ensaio (g).

4.4.4.4 Solubilidade em água quente

Foram pesadas amostras de taquara-lixo de aproximadamente 2 gf cada e misturadas com 100 ml de água destilada quente. As amostras e a água foram colocadas em erlenmeyers de 250 ml e levadas para um banho quente, onde foram mantidas por 3 horas. As amostras foram filtradas em cadinhos filtrantes, lavadas com água quente e levadas à estufa até secar. Depois de secas, as amostras foram colocadas em dessecador até peso constante e então pesadas. O cálculo da solubilidade foi feito de acordo com a Equação 39 e os ensaios foram realizados em triplicata.

$$\%E_q = \frac{(P - P_1)}{P} \cdot 100 \quad (39)$$

onde:

$\%E_q$ = porcentagem de produtos solúveis em água quente.

P = massa inicial da amostra (g).

P_1 = massa após o ensaio (g).

Os métodos descritos para solubilidade tanto em água quente quanto em água fria estão contidos na norma TAPPI T207 cm-99.

4.4.4.5 Determinação do pH

As determinações do pH da taquara-lixo foram realizadas após a solubilização de 2,0 g de partículas de fibra que passaram pela peneira de 40 mesh e ficaram retidas na peneira de 60 mesh em 100 ml de água quente por 3 (três) horas, segundo a norma TAPPI 252 om-12. Utilizou-se o aparato soxhlet/manta térmica para que não houvesse perda de vapor d'água e consequente variação de concentração dos extratos analisados. O material fibroso foi transferido para cadinhos de placas sinterizadas e a fase líquida (estrado aquoso) foi utilizada na determinação do pH. Foram realizadas 3 (três) repetições por espécie. A Figura 21 mostra a vidraria contendo a taquara-lixo com água no estágio final do procedimento de determinação de solúveis em água quente e pode-se ver o pHmetro utilizado na determinação do pH da fibra.

Figura 21 – pHmetro: determinação do pH da taquara-lixá.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

4.4.4.6 Teor de extrativos totais

Para a determinação do teor de extrativos totais foi usada uma sequência de solventes de diferentes polaridades. Nas etapas 1, 2 e 3 foram usados respectivamente etanol-tolueno, etanol e água como solvente. O material que ficou no cartucho de extração foi seco ao ar e submetido à extração da etapa seguinte. O produto final, que define o teor de extrativos totais é a massa de amostra seca que fica retida no cadinho filtrante. O cálculo foi feito de acordo com a Equação 40 e os ensaios foram realizados em triplicata.

$$\%E_{et} = \frac{(P - P_1)}{P} \cdot 100 \quad (40)$$

onde:

$\%E_{et}$ = porcentagem de extrativos totais.

P = massa inicial da amostra (g).

P_1 = massa após o ensaio (g).

Os ensaios realizados seguem as normas TAPPI T204 cm-97. O material resultante dos extrativos totais foi utilizado nos ensaios de teor de lignina. As Figuras 22 e 23 mostram respectivamente as etapas de extração com tolueno-etanol e com etanol.

Figura 22– Extração primeira fase: etanol-tolueno.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Figura 23 – Extração segunda fase: etanol.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

4.4.4.7 Teor de lignina insolúvel

A quantidade de lignina ácida insolúvel nas amostras de taquara-lixia foi determinada de acordo com a norma TAPPI T222 om-02.

Foram pesadas amostras de resíduos de taquara-lixia em diferentes béqueres e acrescentados, aos poucos, 40 ml de ácido sulfúrico 72% a cada béquer, agitando com bastão de vidro. As misturas foram cobertas com vidros de relógio e permaneceram em repouso por 2 horas. Foram adicionados às misturas 300 ml de

água destilada e transferidas para erlenmeyer até volume de 575 mL. As misturas ficaram em banho quente por 4 horas, depois foram retiradas e permaneceram inclinadas sobre a bancada de um dia para o outro para que o material insolúvel pudesse precipitar. As amostras foram filtradas utilizando cadinho filtrante sem agitação, pois a lignina precipitada é um material muito delicado e poderia ser solubilizada novamente na solução. As amostras foram lavadas com água quente, deixadas em estufa, colocadas em dessecador e depois pesadas em balança analítica. As análises foram realizadas em triplicata.

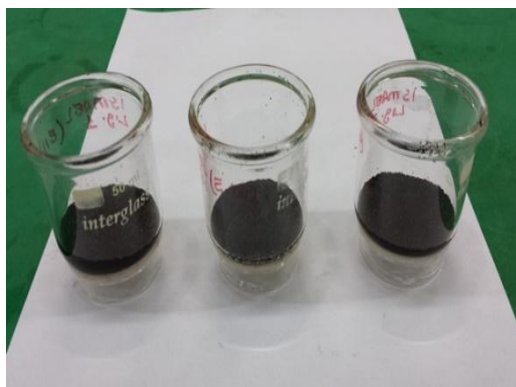
As Figuras 24 e 25 mostram respectivamente a filtração da lignina e a lignina obtida por meio de filtração.

Figura 24 – Filtração da lignina.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Figura 25 – Lignina obtida por meio de filtração.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

4.4.4.8 Teor de holocelulose (celulose + hemicelulose)

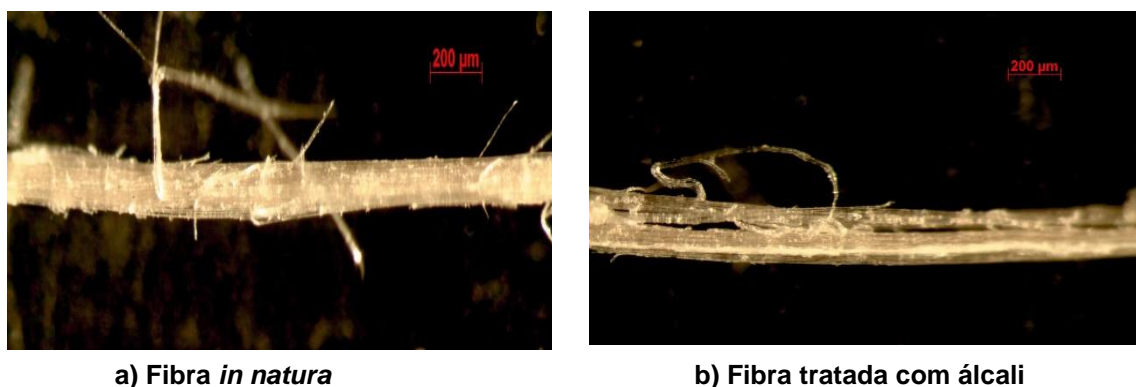
O teor de holocelulose, ou celulose total (α -celulose + β -celulose + γ -celulose) foi determinado por diferença, ou seja, 100% - % lignina - % extrativos totais. Em geral, a α -celulose indica a celulose não degradada, de alto peso molecular contida na fibra, a β -celulose indica celulose degradada e a γ -celulose consiste principalmente de hemicelulose.

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1 Caracterização da fibra de taquara-lixá por imagens de microscopia óptica

A Figura 26 (a e b) mostra imagens por microscopia óptica de fibras de taquara-lixá (*Merostachys skvortzovii* Sendulskiy) *in natura* e tratada e podem ser observadas fibrilas e pequenos nós, semelhantes aos encontrados no colmo de taquara-lixá antes do processo de calandragem. Provavelmente, a morfologia dessas fibras contribui com o seu alto potencial de reforço devido à possibilidade de entrelaçamento mecânico das fibrilas.

Figura 26 - Micrografias de fibras de taquara-lixá.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

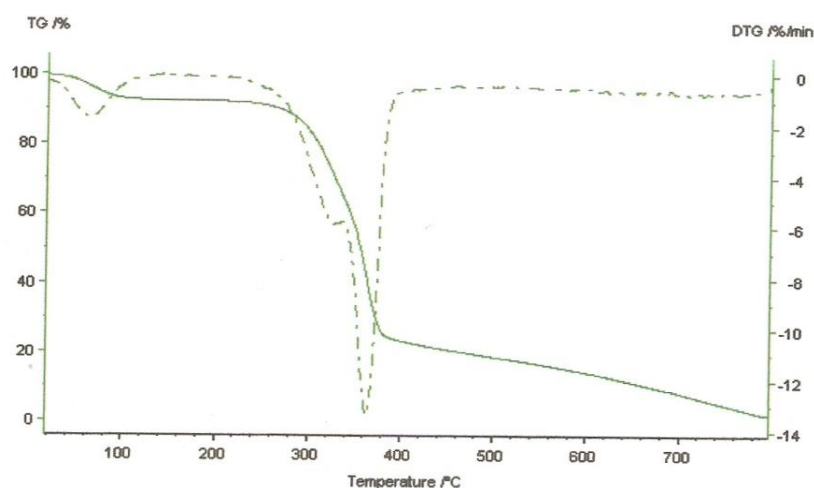
4.5.2 Análise térmica

A análise termogravimétrica informa sobre a estabilidade térmica dos materiais. A Figura 27 mostra a curva de TGA de uma amostra de taquara-lixá. A perda de massa de 7,1%, iniciada em aproximadamente 45 °C corresponde ao teor de umidade da fibra e essa perda vai até aproximadamente 250 °C, quando inicia uma perda de massa significativa que em aproximadamente 380 °C alcança 67,9% aproximadamente. A derivada da curva da Figura 28 mostra um pico de 360 °C. Uma perda de massa de 22,3% ocorre entre 380 e 800 °C. A literatura mostra que na faixa entre 250 a 380 °C ocorre a degradação da hemicelulose e da celulose e na faixa entre 250 a 800 °C ocorre a degradação da lignina (SATYANARAYANA *et al.*, 2013; BROWNING, 2003).

Pode ser concluído que a taquara-lixá é estável termicamente até aproximadamente 250 °C, valor superior ao de fibras de resíduos de agave azul do México e de fibras de bananas do Brasil (220 °C) e iguais aos valores de estabilidade térmica do bagaço de cana e da *Luffa cilíndrica* (SATYANARAYANA *et al.*, 2013).

A alta estabilidade térmica da taquara-lixá pode ser relacionada ao alto índice de cristalinidade (59%) e ao alto teor de lignina da fibra (22,3 a 27,5%). Segundo a análise de TGA, foi obtido um resíduo de 2,7% (100% - 90,2% - 7,1%) proveniente da carbonização da fibra orgânica em atmosfera inerte (geração de coque).

Figura 27 – Curva de TGA de uma amostra de taquara-lixá.

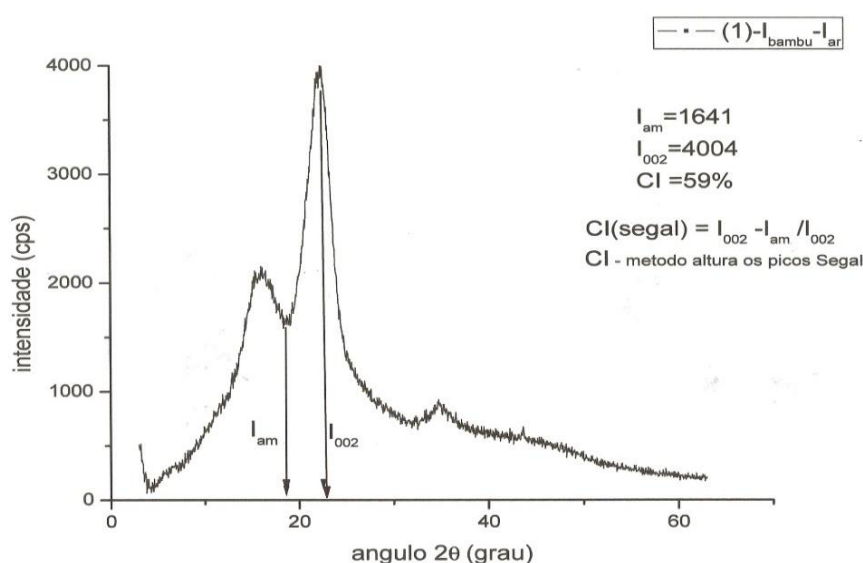


Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

4.5.3 Índice de Cristalinidade

A Figura 28 mostra o difratograma de Raio-X de uma amostra de taquara-lixo e o cálculo do índice de cristalinidade que foi de 59%. A incerteza das medidas por este método vem da estatística e da posição adotada para medida das intensidades e foi estimada em $\pm 1\%$. A Tabela 3 mostra o índice de cristalinidade de várias fibras vegetais e da taquara-lixo tratada com NaOH (60%). A taquara-lixo *in natura* (não tratada) ou tratada com NaOH apresenta índice de cristalinidade similar ao da *Luffa cilíndrica* - bucha vegetal, (TANOBE *et al.*, 2005) e ao das fibras de *Aechmea magdalenae* - pita, (SATYANARAYANA *et al.*, 2014) e maior que os das fibras de bagaço de cana, das fibras de folhas de bananeira (GUIMARÃES *et al.*, 2009) e que o da fibra de coco seco (TOMCZAK *et al.*, 2007). As fibras de resíduo de agave azul cozido, oriundas da produção de tequila e as fibras de curauá e sisal apresentam índices de cristalinidade maiores que o da taquara-lixo (SATYANARAYANA *et al.*, 2013; TOMCZAK *et al.*, 2007; SYDENSTRICKER *et al.*, 2003). Como o tratamento alcalino da taquara-lixo teve pouco efeito no aumento do índice de cristalinidade do material, novamente pode-se sugerir que o tratamento alcalino que gera muito efluente, não é vantajoso.

Figura 28 – Difratograma de Raio-X de amostra de taquara-lixo.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

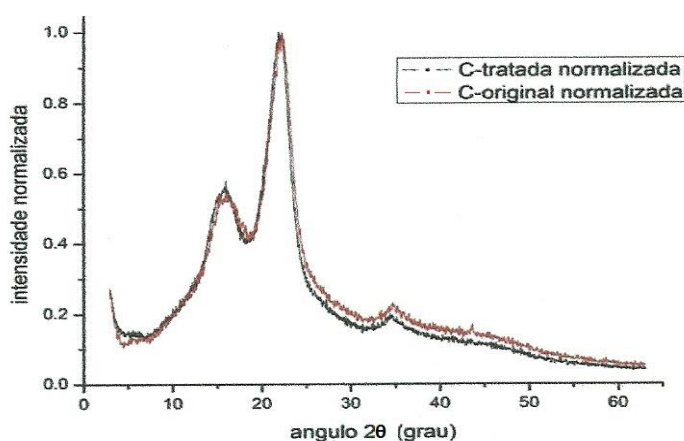
Tabela 3 – Índice de cristalinidade de várias fibras vegetais.

Índice de cristalinidade (%)	Material
59,0	Taquara-lixo não tratada
60,0	Taquara-lixo tratada com NaOH
55,0	Pita
70,0	Resíduo de Agave azul cozido
48,0	Bagaço de cana
66,3	Curauá
39,0	Folhas de banana
59,0	Bucha vegetal
47,8	Fibra de coco seco
72,2	Sisal

Fonte: (SATYANARAYANA *et al.*, 2014; SATYANARAYANA *et al.*, 2013; GUIMARÃES *et al.*, 2009; TOMCZAK *et al.*, 2007 - Part II; TANOBE *et al.*, 2005; SYDENSTRICKER *et al.*, 2003; RAMÍREZ, 2011). Tabela elaborada pelo autor, 2014.

Para melhor visualização dos resultados, colocou-se em um mesmo gráfico os difratogramas das fibras de taquara-lixo não tratada e da fibra tratada (Figura 29). As curvas foram normalizadas pela intensidade da linha mais intensa (planos 002 da estrutura), que ocorrem respectivamente nos ângulos 2θ iguais a 22,30 e 22,10. Pode ser observado através de uma análise rápida e visual, que o tratamento alcalino realizado sobre a fibra alterou muito pouco, ou quase não alterou o estado da cristalinidade da amostra original.

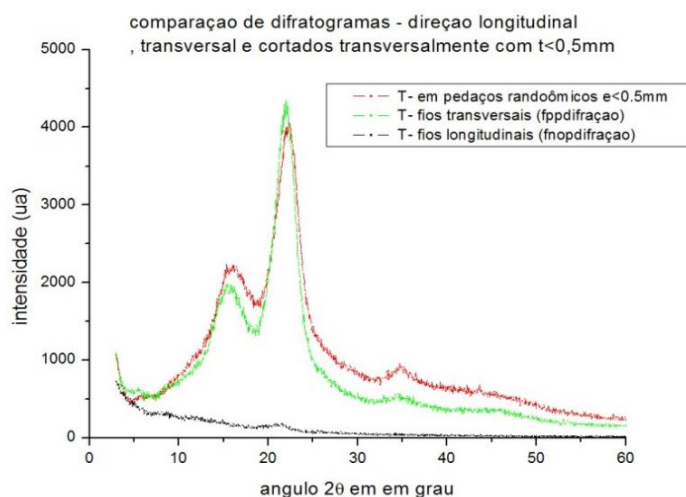
Figura 29 – Sobreposição de difratogramas de taquara-lixo tratada e não tratada.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Conforme comentado no item 4.4.1, de Materiais e Métodos, foi feito um estudo do efeito da direção do posicionamento das fibras de taquara-lixá nos difratogramas obtidos. A Figura 30 mostra a sobreposição das curvas, todas similares.

Figura 30 – Difratogramas sobrepostos, das amostras em direção longitudinal e transversal.

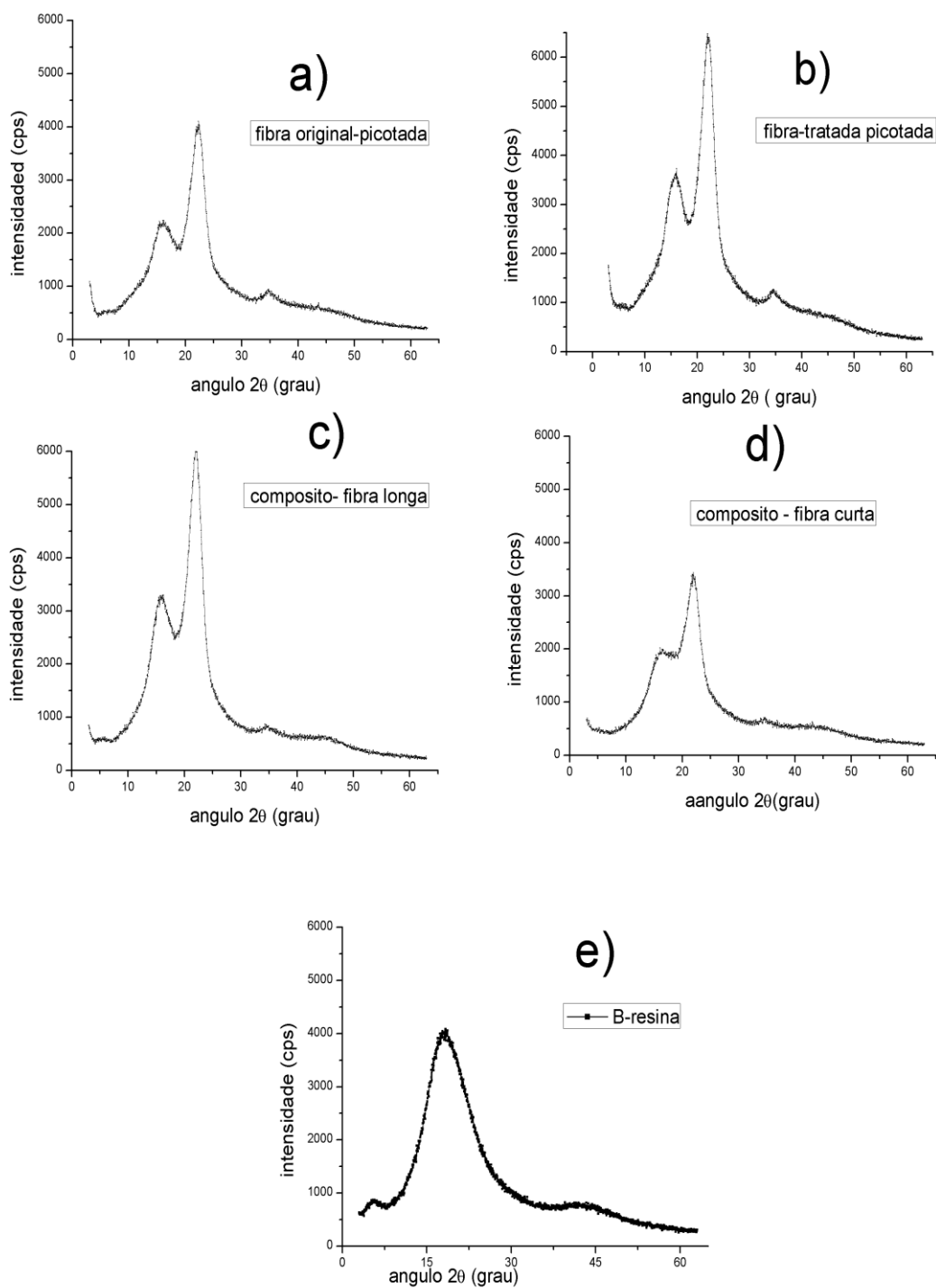


Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

As Figuras 31 (a, b, c, d, e), mostram a sequência de difratogramas obtidos para as amostras de taquara-lixá não tratadas, taquara-lixá tratada com NaOH, compósito preparado com fibras longas, compósito preparado com fibras curtas e resina epóxi utilizada nos compósitos, respectivamente.

Nos difratogramas das amostras, tanto para amostra de fibra longa como fibra curta, nota-se um aumento da intensidade na região de 18° em que ocorre a superposição das laterais das duas linhas mais intensas. Esta contribuição significativa da intensidade nesta região vem exatamente da resina constituinte do compósito, conforme é mostrado no difratograma da resina, obtido em condições idênticas às demais medidas. No caso do compósito de fibras curtas, a contribuição da resina é maior, uma vez que, nota-se visivelmente a presença de mais espaços preenchidos pela resina do que no caso das fibras longas. Este resultado mostra também que qualquer estimativa do índice de cristalinidade das fibras no compósito deve ser realizada com a fibra fora do compósito, uma vez que a presença da resina mascara os resultados.

Figuras 31 (a, b, c, d, e) – Sequência de difratogramas, para taquara-lixá (original) não tratada, tratada com NaOH, fibra longa, fibra curta e matriz.

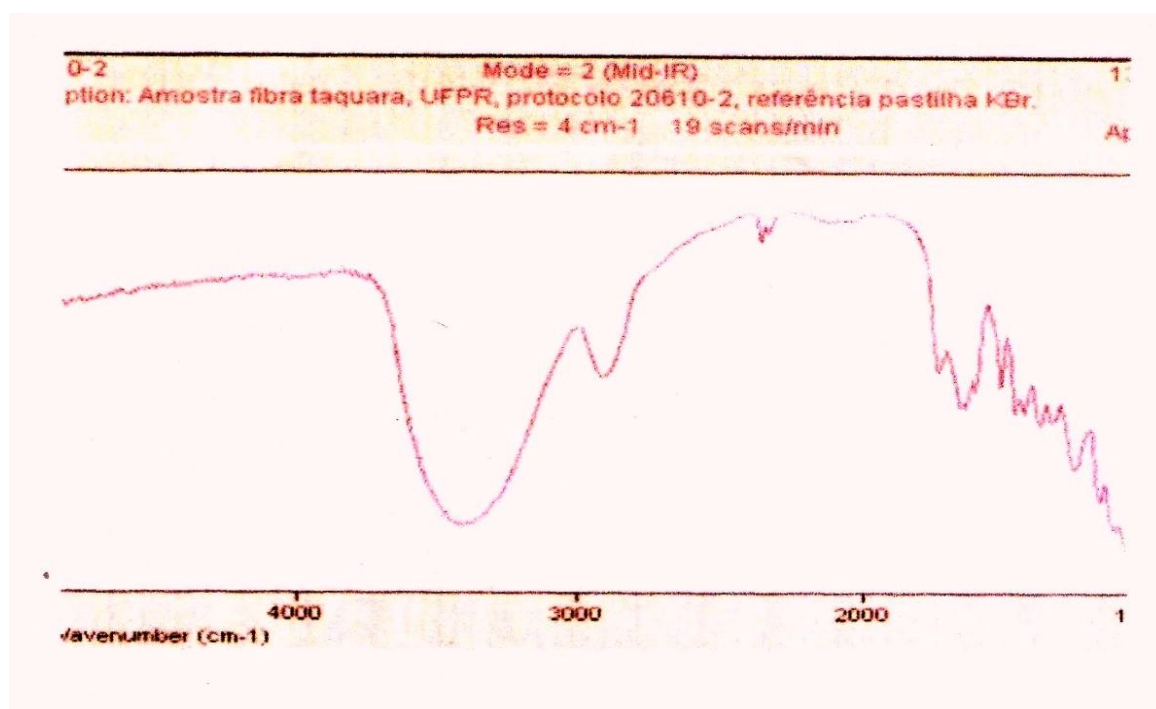


Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

4.5.4 Análise de espectrometria na região do infravermelho por transformada de Fourier – FTIR

A Figura 32 mostra o espectro de infravermelho de uma amostra de taquara-lix. Pode ser observado que na região de $3\,390\text{ cm}^{-1}$ a banda é larga, característica do estiramento de grupos hidroxílicos (OH) da celulose e da presença de água. A banda a $2\,903\text{ cm}^{-1}$ é referente ao estiramento do C-H alifático dos grupos metila e metileno. A banda a $1\,738\text{ cm}^{-1}$ é referente ao estiramento dos grupos carboxílicos (C=O) presentes na hemicelulose. A banda a $1\,669\text{ cm}^{-1}$ é referente ao estiramento dos grupos carboxílicos presentes na lignina. A banda a $1\,552\text{ cm}^{-1}$ é referente a vibrações das ligações C-C no anel aromático da lignina. A banda a $1\,469\text{ cm}^{-1}$ é referente à deformação assimétrica do grupo metila da celulose. A banda a $1\,386\text{ cm}^{-1}$ é referente ao estiramento do grupo C-OH da celulose. A banda a $1\,290\text{ cm}^{-1}$ é referente à deformação angular da hidroxila (OH) presente no anel aromático da lignina. A banda a $1\,193\text{ cm}^{-1}$ é referente ao estiramento do grupo acetil (-COR) da hemicelulose. Por último, bandas na região de $1\,000\text{ cm}^{-1}$ são referentes ao estiramento das ligações C-O-C presentes na celulose, hemicelulose e na lignina (SOUZA JUNIOR *et al.*; 2010; CARDOSO *et al.*, 2013; BRÍGIDA *et al.*, 2010).

Figura 32 – Ensaio de FTIR de uma amostra de taquara-lix.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

4.5.5 Análise da composição química

A Tabela 4 apresenta resultados da análise da composição química e características de amostras tomadas em triplicata, da taquara-lixo tratada ou não com álcali. Pode ser observado que o tratamento com NaOH reduz o teor de umidade e de lignina e a solubilidade em água também diminui. O teor de umidade da taquara-lixo não tratada é menor do que a perda de água verificada na análise térmica, pois se refere apenas à água absorvida do meio ambiente pela fibra e não à água de hidratação. O tratamento alcalino extrai componentes da fibra que se torna mais clara e flexível. A literatura mostra que o tratamento com NaOH aumenta a área superficial da fibra vegetal que pode beneficiar a adesão fibra/matriz de compósitos poliméricos, reduz sua densidade e afeta sua resistência mecânica. Dependendo do tempo de contato, da temperatura e da concentração da solução de NaOH a fibra vegetal pode ter sua resistência mecânica comprometida (SYDENSTRICKER *et al.*, 2003; TANOBE *et al.*, 2005). Reis (2013) realizou um tratamento alcalino da taquara-lixo diferente do usado neste trabalho. Antes do processo de calandragem, Reis utilizou condições mais severas (imersão do material durante 90 minutos em solução de NaOH 10% m/m antes de cada etapa de calandragem, com redução do espaçamento entre os rolos, seguido de tratamento com solução de peróxido de hidrogênio para clareamento adicional) mas mesmo assim, apesar da maior flexibilidade do material, a separação manual das fibras também foi uma etapa de difícil execução.

Seria esperado que o teor de extrativos totais fosse reduzido com o tratamento alcalino, mas no caso da análise da taquara-lixo, os resultados ficaram dentro da margem de erro. Quanto ao pH, as madeiras e os organismos vivos de modo geral tendem a apresentar um caráter ácido como forma de proteção aos micro-organismos. O pH básico da taquara-lixo tratada com NaOH deve ter sido obtido provavelmente em função de uma lavagem insuficiente da fibra com água destilada após o tratamento alcalino (SELLERS, 1994; BROWNING, 2003).

A Tabela 4 mostra ainda que a taquara-lixo não tratada e a tratada com álcali apresentam teor de umidade de 5,6 e 3,3%, respectivamente. Assim, pode-se concluir que a melhoria desta característica não justifica o tratamento químico, considerando a geração de efluentes e o baixo teor de umidade da fibra não tratada.

Tabela 4 – Composição química e características da taquara-lixo tratada ou não tratada com NaOH.

Componente (%) ou característica	Taquara-lixo não tratada	Taquara-lixo tratada
Umidade	5,65 ± 0,10	3,34 ± 0,03
Solubilidade em água fria	4,41 ± 0,03	1,21 ± 0,01
Solubilidade em água quente	5,62 ± 0,04	3,57 ± 0,02
Lignina insolúvel	27,47 ± 1,31	22,32 ± 0,06
Cinzas	0,78 ± 0,02	1,35 ± 0,02
Holocelulose	65,07 ± 1,42	69,83 ± 0,10
pH 1h	4,43 ± 0,16	9,36 ± 0,05
pH 24h	4,53 ± 0,16	9,17 ± 0,05
Extrativos Totais	6,67 ± 0,10	6,50 ± 0,04

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

A Tabela 5 apresenta a composição química de várias fibras vegetais. Na verdade, a literatura mostra que um mesmo material pode apresentar variação na sua composição química devido a diferenças de clima, idade da planta, tipo de solo, método de extração, etc. (GUPTA *et al.*, 2011; GUIMARÃES *et al.*, 2009). A variação de propriedades mecânicas das fibras vegetais é função também do diâmetro variável desses materiais (TOMCZAK *et al.*, 2007 - Part II e III; TANOBE *et al.*, 2005; OSÓRIO *et al.*, 2011). Em relação ao teor de umidade, a Tabela 5 mostra que as fibras vegetais apresentadas absorvem de 8,5 a 11,7% de água.

Pode ser observado que a fibra de coco apresenta um teor bastante alto de lignina (35,4%), o que torna a fibra bastante dura. A madeira de Pinus e o bagaço de cana também apresentam valores altos para o teor de lignina, respectivamente de 30 e 23%. A taquara-lixo apresenta um teor de lignina (27,5%) na faixa da madeira de Pinus e do bagaço de cana. De modo geral, o teor de lignina das fibras vegetais é bem menor, na faixa entre 7,6-16% e o algodão, assim como a paina, contém um baixo teor de lignina e um alto teor de celulose, 88,4% e 81,6%, respectivamente, o que justifica a maciez desses materiais (ANNUNCIADO *et al.*, 2005; BLEDZKI; GASSAN, 1999).

Observa-se que no início do procedimento experimental foi descrito o preparo das fibras usadas neste trabalho. A taquara-lixo com umidade em torno de 30% foi serrada na região dos nós. Os caules, após a retirada dos nós, foram fraturados na forma de gravetos e em seguida foram passados em uma calandra por até 3 vezes. Na etapa seguinte, as fibras foram manualmente separadas ainda no estado úmido, para tornar menos difícil o trabalho. Nessa forma artesanal de preparo, o processo é demorado e bastante penoso e portanto, no caso de possível uso comercial da taquara-lixo será necessário o desenvolvimento de um equipamento adequado à separação das fibras após a etapa de calandragem. A resistência à ruptura das fibras de bambu varia de 391-713 MPa (OSÓRIO *et al.*, 2011), enquanto que o sisal, o curauá e as fibras de coco apresentam tensão na ruptura de respectivamente $324,2 \pm 173,9$ MPa, 87 – 310 MPa e 50 – 275 MPa (SYDENSTRICKER *et al.*, 2003; TOMCZAK *et al.*, 2007 - Part I e II). É importante ressaltar que as fibras de curauá e sisal são consideradas fibras vegetais bastante resistentes, mas a taquara-lixo tem propriedades ainda superiores, sendo, além disso, um material abundante e de baixo custo. Pode-se atribuir a dificuldade de processamento dos caules da taquara-lixo não somente ao seu alto teor de lignina mas também, à alta resistência deste material.

Como também pode ser observado na Tabela 5, a densidade das fibras vegetais é baixa, sendo o sisal, uma das fibras mais densas ($1,26 \text{ g/cm}^3$) e a paina uma das menos densas (densidade menor que $0,62 \text{ g/cm}^3$). Os bambus apresentam densidades na faixa de 0,88 a $1,10 \text{ g/cm}^3$ (OSÓRIO *et al.*, 2011) e se aplicados em compósitos com resina epóxi, que apresenta densidade de $1,1 \text{ g/cm}^3$, resultam ainda em produtos de relativamente baixo peso específico.

Tabela 5 – Composição química de diversas fibras vegetais.

Componente (%) e Densidade (g/cm ³)	Serragem de Pinus ^a	<i>Luffa</i> <i>cilíndrica</i> ^b	Paina ^c	Sisal ^d	Folhas de bananeira ^e	Fibra de coco ^f	Agave azul (cozida) ^g	Bagaço de cana ^e	Curauá ^d
Holocelulose (%)	64,06 ± 0,01	82,4	81,6	83,1	50,92 ± 0,34	63,4	73,6 ± 0,01	71,30 ± 0,60	83,1
Lignina insolúvel (%)	28,98 ± 0,01	11,2	15,1	7,6	17,44 ± 0,19	35,4	15,98 ± 1,20	23,33 ± 0,02	7,6
Cinzas (%)	0,25 ± 0,01	0,4	0,62	3,1	4,14 ± 0,92	1,2	5,30 ± 0,07	2,75 ± 0,19	3,1
Umidade (%)	8,49 ± 0,17		9,2	11,7	8,57 ± 0,19		10,10 ± 0,05	9,21 ± 0,01	11,7
Solubilidade em água	3,48 ± 0,26					4,9	10,64 ± 0,26		
Quente/fria (%)	2,83 ± 0,54						9,74 ± 0,27		
Extrativos totais (%)	6,71 ± 0,07	3,2	3,2	6,2		5,8			6,2
Densidade (g/cm³)	1,07 ± 0,03 ^c	0,92 ± 0,05 ^c	< 0,62 ^c	1,26 ^d		1,2 ^f			

a) TROMBETTA, E., 2010; b) TANOBE *et al.*, 2005; c) ANNUNCIADO *et al.*, 2005; d) SYDENSTRICKER *et al.*, 2003; e) GUIMARÃES *et al.*, 2009; f) RAMIREZ, 2011; g) SATYARAYANA *et al.*, 2013.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2014.

4.5.6 Ensaio de absorção de água pelo compósito

Foram feitos ensaios de absorção de água em dois corpos de prova, CP2-FL e CP6-FC, de compósitos de fibras longas e de fibras curtas após terem os mesmos sido ensaiados à flexão. Os corpos de prova foram serrados e deles retirados cinco segmentos de pequenas dimensões, para serem submetidos ao procedimento descrito. Teve-se o cuidado de pesar-se as amostras antes da primeira secagem em estufa, para com isso ser possível determinar sua umidade percentual “ao ar”. Foram obtidos os seguintes resultados:

a) Compósito de Fibras Longas:

%H₂O ao ar: % h_{ar} = 2,42%;

%H₂O absorvida em 24 horas de imersão: % h_{24} = 8,41%;

Diferença %: % h_{dif} = (% h_{24} - % h_{ar}) = 5,99%.

b) Compósito de Fibras Curtas:

%H₂O ao ar: % h_{ar} = 2,81%;

%H₂O absorvida em 24 horas de imersão: % h_{24} = 8,43%;

Diferença %: % h_{dif} = (% h_{24} - % h_{ar}) = 5,62%.

Percebe-se que o percentual de água absorvido é praticamente igual para os dois compósitos e que para ambos, ficou muito abaixo daquele percentual que se aceita existir na madeira verde (30%). Mesmo “ao ar”, compósitos retêm muito menos umidade que as madeiras (10 a 15%). A diferença refere-se ao volume absorvido a partir da umidade existente “ao ar”.

Segundo Pfeil e Pfeil (2003), a umidade tem grande efeito sobre as propriedades das madeiras. Com o aumento da umidade, a resistência diminui até ser atingido o ponto de saturação das fibras; acima desse ponto a resistência se manteria constante.

Acima do ponto de saturação das fibras (30% de umidade), o volume e o peso específico da madeira não são influenciados pelo grau de umidade, resultando numa resistência, praticamente, constante.

Tendo em vista as semelhanças existentes entre as propriedades mecânicas da madeira e as dos compósitos estudados, pode-se em primeira aproximação

aceitar um comportamento semelhante para estes últimos, mas com resistência menos influenciada pela variação da umidade.

Finalmente, observa-se que sendo a diferença entre os índices de absorção de água, praticamente inexistente entre os dois tipos de compósitos estudados, não deverá haver reflexos quanto ao comportamento de uma viga-sanduíche, em relação a esta característica física.

4.5.7 Ensaios de Flexão de Três Pontos

Nas três primeiras etapas da primeira parte deste trabalho, foram executados Ensaios de Flexão de Três Pontos em sete corpos de prova, quatro de fibras longas alinhadas e três de fibras curtas com orientação aleatória. Os ensaios foram feitos em uma Prensa Universal EMIC DL 30000, variando-se as distâncias entre apoios, com a utilização de uma célula de carga de 1 000 N com velocidade de ensaio de 1 mm/minuto. Utilizou-se um deflectômetro eletrônico acoplado ao sistema de aquisição de dados, medindo a deflexão do corpo de prova no ponto médio, entre apoios, do banzo inferior das amostras. (Figura 33).

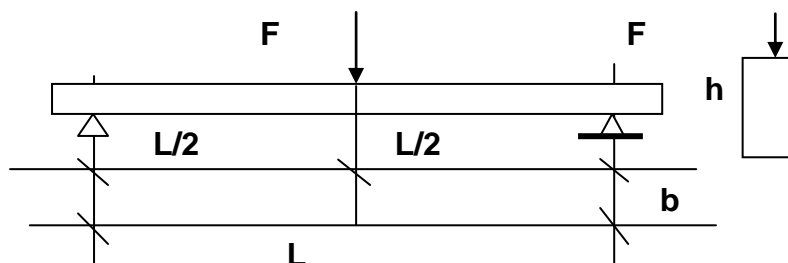
Figura 33 – Máquina universal EMIC DL30000 e posicionamento do deflectômetro (UDESC/Joinville).



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

A Figura 34 mostra a representação esquemática de um ensaio de flexão de três pontos.

Figura 34 – Representação esquemática do Ensaio de Flexão de Três Pontos e Seção Reta da amostra ensaiada.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Todos os ensaios foram feitos dentro do limite elástico do material, limitando-se as deflexões em 3 mm para os ensaios efetuados na posição em que a maior dimensão da seção era a base e em 1,5 mm quando a maior dimensão era a altura da seção reta.

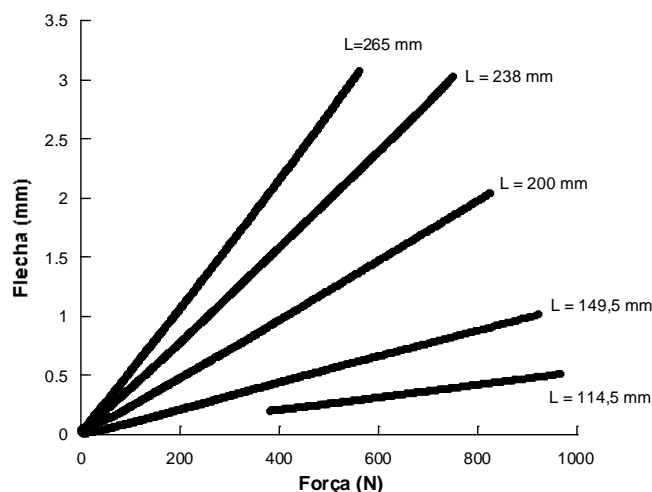
Convencionou-se, nesse trabalho, chamar de Posição A, a posição de ensaio do corpo de prova em que a direção da força de ensaio coincidia com a direção do carregamento de moldagem e de Posição B a posição de ensaio em que a direção da força de ensaio coincidia com a direção perpendicular à do carregamento de moldagem.

Cada corpo de prova foi ensaiado segundo cinco diferentes distâncias entre apoios (265 mm, 238 mm, 200 mm, 149,5 mm e 114,5 mm) e duas posições perpendiculares entre elas, da seção reta, sendo assim efetuados nessa primeira parte 70 ensaios.

Os ensaios permitiram a elaboração de gráficos cartesianos de Força vs. Flecha (deformação), os quais foram tratados, selecionando-se nesses gráficos os segmentos, aproximadamente, lineares em cada ensaio e fazendo-se correção de suas origens, conforme exemplo a seguir.

A Figura 35 apresenta um exemplo de gráfico construído para um Corpo de Prova ensaiado, para cinco diferentes distâncias entre apoios.

Figura 35 – Gráfico para o Ensaio do CP1, Fibras Longas – Posição A.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Com o auxílio do aplicativo computacional KaleidaGraph, *Version 4.03*, de Synergy Software (2006), foram efetuados os tratamentos de todos os dados experimentais e os cálculos que se apresentam a seguir, em todas as etapas do trabalho.

Os gráficos correspondentes a todos os corpos de prova ensaiados na primeira parte deste trabalho estão disponíveis no Apêndice A.

4.6 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.6.1 Preparo das fibras

Inicialmente o material vegetal tomado em seu estado “verde” (umidade natural acima de 30%), teve serrados seus colmos, eliminando-se os nós e os diafragmas e selecionando-se aqueles entrenós com comprimentos variando entre 200 e 350 mm (Figura 36). Os nós são regiões dos colmos com maior concentração de fibras, tendo sido eliminados para que se obtivesse um material com maior homogeneidade e de melhor trabalhabilidade. Os entrenós foram então fraturados, longitudinalmente, na forma de “gravetos” com 10 mm de largura, tendo em função

da própria espessura da parede da taquara, entre 2 e 3 mm de espessura. Nesta fase, é necessário certo cuidado, tendo em vista a grande quantidade de insetos (formigas, cupins e mesmo aranhas), alguns bastante agressivos, que se alojam no micro-habitat proporcionado pelos miolos ocos dos colmos (LOSOVEI, 2001).

Figura 36 – Preparo das fibras. Corte dos entrenós.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Em seguida, estes gravetos foram passados entre os rolos de uma calandra aperfeiçoada no laboratório de polímeros da UDESC/Joinville (Figura 37). Estes rolos permitem ajuste na distância entre eles e ainda possuem ranhuras e uma pequena diferença (1 mm), no desenvolvimento de suas superfícies, facilitando o esmagamento de “gravetos” com espessuras variáveis entre 1 e 3 mm.

Figura 37 – Calandra desenvolvida para processamento das fibras vegetais.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Nesse processo à medida em que os gravetos são introduzidos entre os rolos que giram em direções contrárias, são eles esmagados, tendo suas fibras separadas até a espessura pré-determinada e líquidos, compostos por água e resinas (extrativos) são eliminados, resultando as fibras separadas e com umidade menor que a inicial.

Notou-se que a quantidade de água e extrativos (0,1 a 0,3 litro por quilograma de material bruto processado), resultante do processo era uma função do estado natural de umidade dos colmos e da época de colheita do material e ainda do tempo decorrido entre a colheita e o processamento, sendo maior, quanto maior a umidade presente no material.

Foram feitas duas a três passagens de todo o material entre os rolos sendo que a cada nova passagem era reduzida a distância entre eles, o que ao final do processo, conferiu uma separação bastante perceptível a olho nu, em relação ao estado original das fibras, no material *“in natura”*.

A distância mínima permitida entre os rolos foi de 0,5 mm, de forma a não serem danificados os aglomerados de fibras, em sua integridade longitudinal.

O passo seguinte, com o material ainda úmido, foi a separação manual das fibras, a partir do estado resultante da última calandragem, o que foi conseguido com menor dificuldade enquanto o material estava mais úmido.

Nesse ponto, o material foi selecionado, grosseiramente, por comprimento de fibras, visando um maior rendimento nas fases seguintes do processo em que seriam preparadas fibras (cortadas), com comprimentos variáveis conforme o interesse do projeto em andamento (25 ou 280 mm).

Na sequência, o material foi pesado com a umidade remanescente e colocado em estufa, por 24 horas, a uma temperatura de 100 °C, após o que foi, novamente, pesado antes de ser devolvido à temperatura ambiente em dessecador, permanecendo, ao final, com umidade em torno de 5%, ao ar.

Observe-se que para tornar mais fácil o trabalho, durante o processamento manual, o material foi mantido submerso em água limpa (umidade média de 30%). Na medida em que o processo era executado, as fibras iam sendo armazenadas “ao ar” e naturalmente perdendo umidade até a mesma equalizar-se com a umidade ambiente (15 a 20%).

A Figura 38 mostra o material durante o processamento, após a primeira e a segunda passagem na calandra e finalmente, após separação manual e secagem em estufa por 24 horas.

Figura 38 – Amostras de fibras sem tratamento químico, após a primeira passagem na calandra, após a segunda passagem e após separação manual e secagem.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Na sequência as fibras foram cortadas em uma guilhotina manual, com dispositivo de prensagem que permitia o corte por cisalhamento e precisão aceitável, nos comprimentos de fibra desejados.

Fibras longas e curtas foram assim cortadas manualmente, em comprimentos de 280 mm e 25 mm, secadas, novamente, em estufa a 80 °C por 24 horas, esfriadas em dessecador e pesadas, antes da moldagem de dois blocos de compósitos, um para cada comprimento de fibras.

Cumprir observar que o processo de preparação das fibras aqui descrito foi desenvolvido e aperfeiçoado pelos componentes do grupo de pesquisa, no Laboratório da UDESC/Joinville, sob a coordenação e supervisão do Prof. Dr. Ricardo Pedro Bom.

4.6.2 Preparo dos compósitos de matriz de resina epóxi, reforçados com fibras longas e fibras curtas de taquara-lixá

Foram preparados dois blocos de compósitos de matriz de resina epóxi e fibras aglomeradas de taquara-lixá sem tratamento químico.

Utilizou-se para a preparação dos blocos, um molde de aço de 280 x 60 x 50 (mm). A carga de compressão utilizada na moldagem foi de 5 tf e para sua aplicação

foi empregada uma prensa hidráulica capaz de reter a carga aplicada durante períodos maiores que 24 horas (Figura 39).

Figura 39 – Compressão durante a moldagem dos blocos de compósitos.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Os blocos de compósitos foram preparados e mantidos sob carga de 5 tf, durante 24 horas e então retirados do molde. Em seguida, estes blocos de compósitos foram colocados por 24 horas em estufa, à temperatura de 75 °C, completando-se assim a sua cura.

Posteriormente, os blocos de compósitos foram submetidos a uma operação de fresagem e divididos em corpos de prova com dimensões convenientes, procurando-se o melhor aproveitamento possível e permitido pelas dimensões resultantes nos blocos.

Obtiveram-se assim quatro corpos de prova no bloco de fibras longas, com 56% de fibras em volume, e três corpos de prova no bloco de fibras curtas, com 54% de fibras em volume, conforme apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Dimensões dos corpos de Prova

Descrição	CP Nº	Base a (mm)	Altura b (mm)	Comprimento c (mm)
Carga de compressão: 5 tf.				
Fibras longas, alinhadas Fração volumétrica: 56% (m/m)	1	22,82	13,27	280,00
	2	23,09	13,15	280,00
	3	23,18	13,35	280,00
	4	22,96	13,42	280,00
Fibras curtas, dispersas Fração volumétrica: 54% (m/m)	5	15,21	19,34	280,00
	6	15,19	19,13	280,00
	7	15,08	19,00	280,00

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

A Figura 40 mostra corpos de prova de fibras longas (FL) e fibras curtas (FC), na posição de ensaio A, após o preparo descrito acima.

Figura 40 – Imagem de corpos de prova antes de serem ensaiados.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

5 INVESTIGAÇÃO METODOLÓGICA PARA DEFINIR UMA FERRAMENTA DE CÁLCULO PARA A CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS – PRIMEIRA PARTE

Nesta primeira parte do trabalho experimental que foi dividida em três etapas, investigou-se qual dos métodos disponíveis seria mais conveniente para caracterizar fisicamente os compósitos desenvolvidos e, para isso, pesquisou-se entre as normas técnicas relacionadas com ensaios de compósitos e madeiras, aquelas que apresentassem métodos que tornassem possível esta caracterização física levando ao cálculo dos Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento, assim como, permitissem determinar tensões e deslocamentos em ensaios laboratoriais.

Foram consideradas desta forma as seguintes normas técnicas que tratam de caracterização de amostras de materiais através de Ensaios de Flexão de Três Pontos, disponíveis, já descritas acima e ainda uma adaptação da Teoria das Vigas ao método proposto pela norma ASTM D198 – 2013 (Método dos Vãos Variáveis):

1. Norma ASTM D198 – 2013; American Society for Testing and Materials;
2. Norma ASTM D790 – 2010; American Society for Testing and Materials.

5.1 PRIMEIRA ETAPA – MÉTODO ASTM D198 – 2013 (MÉTODO DOS VÃOS VARIÁVEIS)

5.1.1 Metodologia Proposta

Conforme prescreve a Norma ASTM D198-2013, (Método dos Vãos Variáveis), calculou-se inicialmente o Módulo de Elasticidade Aparente, utilizando-se a Equação 41:

$$E_{ap} = \frac{1}{4b} \left(\frac{L}{h} \right)^3 * \frac{F}{f} \quad (41)$$

Nessa equação, ***h*** e ***b*** são as dimensões em (mm) da seção transversal do CP, ***L*** é a distância em (mm) entre os apoios, ***F*** a força aplicada em (N) e ***f*** a flecha, também medida em (mm).

A Norma aplicada é fundamentada na Teoria das Vigas de Timoshenko, assumindo que a flecha de uma viga tem componentes devidas ao Momento Fletor e à Força Cortante (Timoshenko e Gere, 1999) e permite o cálculo simultâneo dos valores dos Módulos de Elasticidade Longitudinal Verdadeiro e de Cisalhamento, utilizando a seguinte Equação 42:

$$\frac{1}{E_{ap}} = \frac{1}{E_v} + \frac{1}{G} * k \left(\frac{h}{L}\right)^2 \quad (42)$$

Nessa equação, E_{ap} é o Módulo de Elasticidade Aparente, em (MPa), calculado pela Equação 35, E_v é o Módulo de Elasticidade Longitudinal Verdadeiro, em (MPa), G é o Módulo de Cisalhamento em (MPa), segundo a direção perpendicular à seção reta considerada, h é a altura da seção considerada no CP e k é o coeficiente adimensional chamado “Fator de Forma” (que é o recíproco do Coeficiente de Cisalhamento “ K ”) e considerado nesse método igual a 1,2 para seções retangulares.

A Norma ASTM D198-2013 prescreve que deve haver a relação mínima de $\frac{1}{12} \geq \frac{h}{L}$ onde h é a altura da seção reta da amostra e L é o comprimento do vão entre os apoios e ainda que a distância entre os apoios deve variar de modo que mantenham-se incrementos de $\left(\frac{h}{L}\right)^2$, aproximadamente, iguais. (Observa-se que a Norma ASTM D790-2010 recomenda uma relação mínima de $\frac{1}{16} \geq \frac{h}{L}$).

Nas Tabelas 7 e 8, relacionam-se os valores do Módulo de Elasticidade Aparente, calculados pela Equação 41 para os CP de Fibras Longas, nas Posições A e B, respectivamente, acompanhados dos valores auxiliares de $\frac{1}{E_{ap}}$ e $\left(\frac{h}{L}\right)^2$, calculados para cada CP.

(Observação: repare-se que as diferenças entre os valores de $\left(\frac{h}{L}\right)^2$, para cada vão “ L ”, são pequenas, mas não podem ser consideradas iguais).

Tabela 7 – Módulos de Elasticidade Aparente, para CP de Fibras Longas, na Posição A.

MÓDULOS DE ELASTICIDADE APARENTE PARA CORPOS DE PROVA DE FIBRA LONGA-POSIÇÃO A						
	CP1-A	h=13,24 (mm)		CP2-A	h=13,15 (mm)	
L (mm)	Eap (MPa)	1/Eap (MPa ⁻¹)	(h/L) ² (mm/mm) ²	Eap (MPa)	1/Eap (MPa ⁻¹)	(h/L) ² (mm/mm) ²
265	16 381	6,10E-05	0,00253408	15 658	6,3865E-05	0,002462407
238	16 113	6,21E-05	0,00314165	14 971	6,6796E-05	0,003052795
200	15 547	6,43E-05	0,00444889	14 762	6,7741E-05	0,004323063
149,5	14 407	6,94E-05	0,00796213	14 092	7,0962E-05	0,007736938
114,5	13 470	7,42E-05	0,01357378	12 995	7,6953E-05	0,013189871

	CP3-A	h=13,35 (mm)		CP4-A	h=13,42 (mm)	
L (mm)	Eap (MPa)	1/Eap (MPa ⁻¹)	(h/L) ² (mm/mm) ²	Eap (MPa)	1/Eap (MPa ⁻¹)	(h/L) ² (mm/mm) ²
265	14 441	6,92473E-05	0,002537878	14 077	7,10379E-05	0,002564562
238	14 264	7,01066E-05	0,003146361	13 432	7,44491E-05	0,003179444
200	13 560	7,37463E-05	0,004455563	13 205	7,57289E-05	0,00450241
149,5	12 413	8,05607E-05	0,007974072	11 583	8,63334E-05	0,008057914
114,5	11 892	8,40901E-05	0,013594134	12 423	8,04959E-05	0,013737068

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Tabela 8 – Módulos de Elasticidade Aparente, para CP de Fibras Longas, na Posição B.

MÓDULOS DE ELASTICIDADE APARENTE PARA CORPOS DE PROVA DE FIBRA LONGA-POSIÇÃO B						
	CP1-B	h=22,82 (mm)		CP2-B	h=23,90 (mm)	
L (mm)	Eap (MPa)	1/Eap (MPa ⁻¹)	(h/L) ² (mm/mm) ²	Eap (MPa)	1/Eap (MPa ⁻¹)	(h/L) ² (mm/mm) ²
265	16 390	6,10E-05	0,00741548	13 457	7,4311E-05	0,008133998
238	15 701	6,37E-05	0,00919343	12 748	7,8444E-05	0,010084210
200	14 938	6,69E-05	0,01301881	12 182	8,2088E-05	0,0142800025
149,5	12 325	8,11E-05	0,02329962	10 490	9,5329E-05	0,025557209
114,5	9 565	1,05E-04	0,03972101	7 995	0,00012508	0,043569726

	CP3-B	h=23,18 (mm)		CP4-B	h=22,96 (mm)	
L (mm)	Eap (MPa)	1/Eap (MPa ⁻¹)	(h/L) ² (mm/mm) ²	Eap (MPa)	1/Eap (MPa ⁻¹)	(h/L) ² (mm/mm) ²
265	13 502	7,40631E-05	0,007651298	15 760	6,34518E-05	0,007506751
238	13 300	7,5188E-05	0,009485778	14 839	6,739E-05	0,009306574
200	11 864	8,42886E-05	0,01343281	13 500	7,40741E-05	0,01317904
149,5	9 184	0,000108887	0,024040554	10 816	9,24556E-05	0,023586385
114,5	7 547	0,000132505	0,040984146	9 054	0,000110455	0,040209882

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Nas Tabelas 9 e 10, relacionam-se os valores do Módulo de Elasticidade Aparente, calculados pela Equação 41 para os CP de Fibras Curtas, nas Posições A e B, respectivamente, acompanhados dos valores auxiliares de $\frac{1}{E_{ap}}$ e $\left(\frac{h}{L}\right)^2$, calculados para cada CP, cabendo aqui a mesma observação feita anteriormente:

Tabela 9 – Módulos de Elasticidade Aparente, para CP de Fibras Curtas, na Posição A.

MÓDULOS DE ELASTICIDADE APARENTE PARA CORPOS DE PROVA DE FIBRA CURTA-POSIÇÃO A									
	CP5-A	h=15,21 (mm)		CP6-A	h=15,19 (mm)		CP7-A	h=15,08 (mm)	
L (mm)	Eap (MPa)	1/Eap (1/MPa)	(h/L) ² (mm/mm)	Eap (MPa)	1/Eap (1/MPa)	(h/L) ² (mm/mm)	Eap (MPa)	1/Eap (1/MPa)	(h/L) ² (mm/mm)
265	6 927	1,44E-04	0,00329433	7 403	0,00013507	0,003285669	8 893	0,000112449	0,003238254
238	6 962	1,44E-04	0,00408418	7 456	0,00013412	0,004073443	7 511	0,000133133	0,00401466
200	6 958	1,44E-04	0,0057836	7 366	0,00013577	0,005768403	7 576	0,000131992	0,00568516
149,5	7 234	1,38E-04	0,01035085	7 264	0,00013765	0,010323647	7 130	0,000140243	0,010174669
114,5	6 582	1,52E-04	0,01764605	7 082	0,00014119	0,017599672	6 853	0,000145919	0,017345695

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Tabela 10 – Módulos de Elasticidade Aparente, para CP de Fibras Curtas, na Posição B.

MÓDULOS DE ELASTICIDADE APARENTE PARA CORPOS DE PROVA DE FIBRA CURTA-POSIÇÃO B									
	CP5-B	h=19,34 (mm)		CP6-B	h=19,13 (mm)		CP7-B	h=19,00 (mm)	
L (mm)	Eap (MPa)	1/Eap (1/MPa)	(h/L) ² (mm/mm)	Eap (MPa)	1/Eap (1/MPa)	(h/L) ² (mm/mm)	Eap (MPa)	1/Eap (1/MPa)	(h/L) ² (mm/mm)
265	6 063	1,65E-04	0,00532625	6 939	0,00014412	0,005211205	6 999	0,000142865	0,005140619
238	6 064	1,65E-04	0,00660327	6 861	0,00014574	0,006460647	7 012	0,000142605	0,006373137
200	6 074	1,65E-04	0,00935089	6 767	0,00014777	0,009148923	6 942	0,000144049	0,009025
149,5	6 055	1,65E-04	0,01673519	5 693	0,00017565	0,016373727	6 630	0,000150818	0,016151945
114,5	4 092	2,44E-04	0,02853001	5 219	0,00019159	0,0279138	5 790	0,000172709	0,027535707

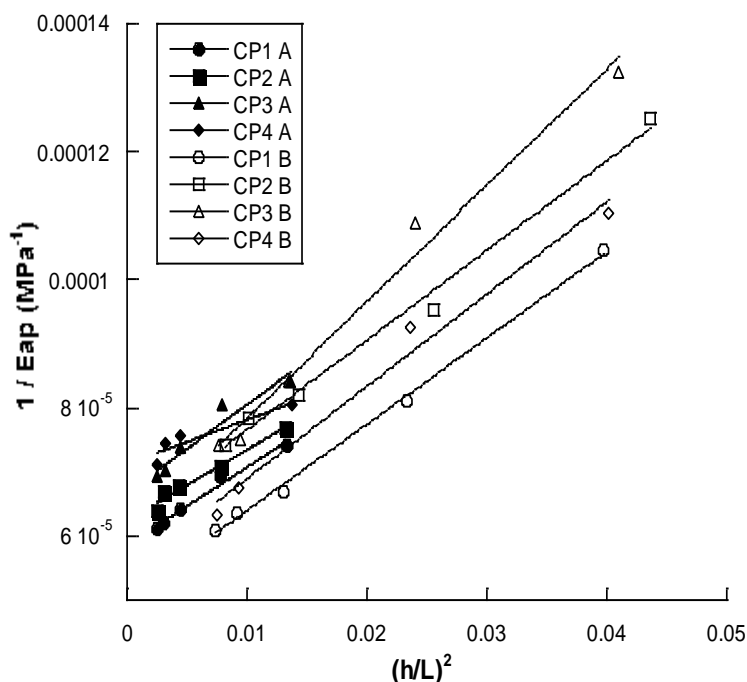
Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Assim, para cada relação $\left(\frac{h}{L}\right)$, calculou-se o valor de E_{ap} aplicando-se a Equação 41. A seguir, com base nos resultados obtidos, representam-se os pontos em um gráfico cartesiano de $\frac{1}{E_{ap}}$ vs. $\left(\frac{h}{L}\right)^2$ e fazendo-se uma interpolação da Equação 42 sobre os pontos do gráfico, com o aplicativo utilizado é obtida uma reta. A interseção desta reta com o eixo das ordenadas representa $\frac{1}{E_{ap}}$, e sua declividade fornece o valor de G permitindo, finalmente, a obtenção de E_v .

(Observação: justifica-se a apresentação destes valores com elevado número de casas decimais para que se avalie com facilidade a diferença recomendada pela norma, entre os valores de $\left(\frac{h}{L}\right)^2$).

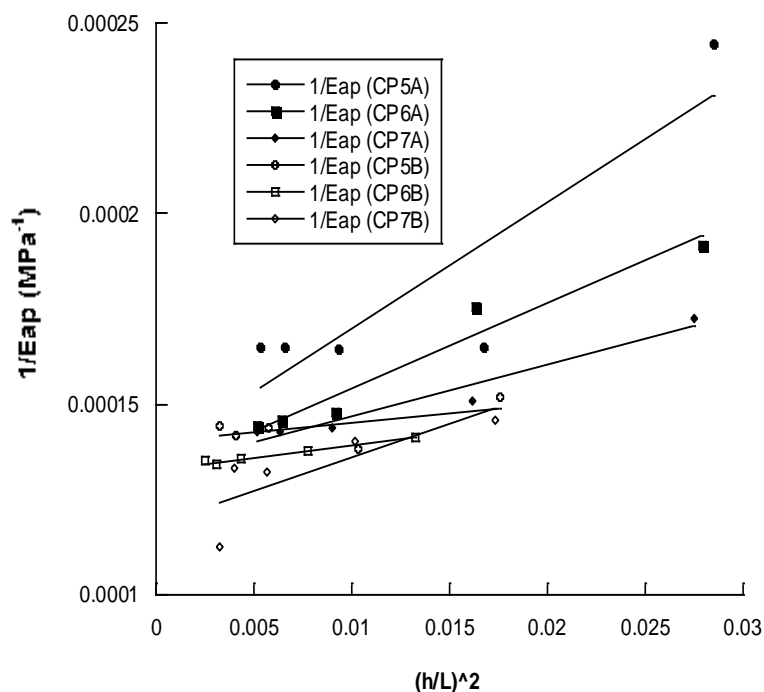
As Figuras 41 e 42 mostram os pontos apresentados nas Tabelas 7 e 8 e as retas resultantes das interpolações da Equação 42, para os CP de fibras longas, nas Posições A e B e os pontos apresentados nas Tabelas 9 e 10 e as retas resultantes das interpolações da Equação 42, para os CP de fibras curtas, também nas Posições A e B, respectivamente:

Figura 41 – Retas obtidas por interpolação da Equação 42, relativas aos CP de Fibras Longas, nas Posições A e B.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Figura 42 – Retas obtidas por interpolação da Equação 42, relativas aos CP de Fibras Curtas, nas Posições A e B.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

As Tabelas 11 e 12 resumem os valores de Módulos de Elasticidade Verdadeiros e de Cisalhamento, obtidos conforme prescreve o Método dos Vãos Variáveis, preconizado pela Norma ASTM D198-2013, aplicada, para os corpos de prova de Fibras Longas e Curtas, respectivamente, nas Posições A e B:

Tabela 11 - Módulos de Elasticidade e Módulos de Cisalhamento, para Corpos de Prova com Fibras Longas, nas Posições A e B.

Posição A	Módulo E (MPa)	Módulo G (MPa)	Posição B	Módulo E (MPa)	Módulo G (MPa)
CP1-A	17 057±223	986±84	CP1-B	19 806±323	890±25
CP2-A	16 015±209	1 082±109	CP2-B	15 975±469	857±47
CP3-A	14 964±379	872±142	CP3-B	16 607±777	660±45
CP4-A	14 029±303	1 735±514	CP4-B	18 330±781	833±60
Média	15 516±654	1 169±193	Média	17 680±866	810±52

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Tabela 12 - Módulos de Elasticidade e Módulos de Cisalhamento, para Corpos de Prova com Fibras Curtas, nas Posições A e B.

Posição A	Módulo E (MPa)	Módulo G (MPa)	Posição B	Módulo E (MPa)	Módulo G (MPa)
CP5-A	7 302±829	364±109	CP5-B	7 145±197	2 409±1915
CP6-A	7 585±246	536±66	CP6-B	7 522±027	1 944±194
CP7-A	7 502±154	890±118	CP7-B	8 426±516	691±300
Média	7 463±84	597±155	Média	7 698±380	1 680,9±514

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

5.1.2 Discussão

Sistematizando os valores de Módulo de Elasticidade para Compósitos com fibras vegetais de taquara-lixia e bambu, conforme obtidos por diversos outros pesquisadores e observando que estes valores foram obtidos em Ensaio de Flexão de Três Pontos, em que os corpos de prova precisaram ser levados à ruptura e assim ensaiados uma única vez, pode-se apresentar a seguinte Tabela 13:

Tabela 13 – Módulos de Elasticidade obtidos em materiais semelhantes, por outros autores.

AUTOR	Características do Compósito	Tratamento dado às fibras	Módulo de elasticidade (GPa)
Alves (2012)	Gravetos de taquara-lixa + Poliéster	Mecânico	10,3 a 19,9
Reis (2013)	Fibras separadas de taquara-lixa + Epóxi	Tratamento químico; comprimento 280 mm	13 a 23
Martins et al. (2012)	Fibras de bambu + Poliéster,	Comprimento 35 mm; 10%, 20% e 30% (m/m)	1,19 a 1,39
Reis (2013)	Fibras separadas de taquara-lixa + Poliéster	Tratamento químico, compr. 280 mm; 40%, 60%, 70% e 75% (m/m)	12,7 a 23,1
Reis (2013)	Fibras separadas de taquara-lixa + Epóxi	Tratamento químico; compr. 280 mm; 40%, 60% e 75% (m/m)	14,2 a 24,2
Reis (2013)	Fibras separadas de taquara-lixa + Epóxi	Tratamento químico; compr. 25 mm; 50% a 60% (m/m)	7,6 a 8,3
Bom (2013)	Fibras de taquara-lixa moída + Epóxi	Sem tratamento; fibra moída	3,75
Bom (2013)	Fibra longa de taquara-lixa + Epóxi	Sem tratamento comprimento 280 mm	20,3
Reis (2013)	Fibras separadas de taquara-lixa + Epóxi	Tratamento químico; compr. 280 mm; 60%	20,5
Reis (2013)	Fibras separadas de taquara-lixa + Epóxi	Tratamento químico; compr. 25 mm; 60%	8,3

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Nesta etapa do trabalho, percebe-se que uma parte das amostras não se enquadra nas recomendações dimensionais da norma aplicada (ASTM D 2013). A justificativa para isso é que a extração dos corpos de prova a partir dos blocos foi feita com o critério de melhor aproveitamento dos mesmos.

Assim, para os CP de Fibra Longa, na Posição A e vãos de ensaios 265 mm, 238 mm, 200 mm, 149,5 mm e 114,5 mm, apenas os três maiores vãos (265 mm, 238 mm e 200 mm) ficaram enquadrados nas exigências dimensionais mínimas já que tomando-se as alturas de CP (13,15 mm, 13,24 mm, 13,35 mm e 13,43 mm) e multiplicando-se por 12 obtém-se valores maiores que 149,5 mm. Para os mesmos CP de Fibras Longas, analisando os ensaios na Posição B, considerando-se a menor das alturas ensaiadas (22,82 mm) e multiplicando-se por 12 encontra-se, aproximadamente, 274 mm, que é maior que o maior dos vãos ensaiados fazendo com que nenhum dos ensaios nessa posição, a rigor, possa ser enquadrado nas prescrições.

No caso dos CP de Fibras Curtas, pode-se verificar que, apenas estão dentro das exigências todos os relativos à Posição B, se for considerado o vão maior (265 mm), isto é: CP5 – B; CP6 – B e CP7 – B.

Quanto à progressividade dos vãos adotados, também se deve observar que os incrementos dos valores de $(h/L)^2$ não podem ser considerados a rigor, aproximadamente, iguais para a sequência de vãos 114,5 mm, 149,5 mm, 200,0 mm, 238 mm e 265 mm, quaisquer que sejam as alturas de seções dos CP ensaiados (Tabelas 7, 8, 9 e 10).

Entretanto, analisando-se todos os resultados obtidos e comparando-se seus valores com aqueles dos CP, que mais aproximadamente atendiam às exigências da Norma ASTM D198-13, pôde-se perceber, claramente, não existirem divergências consideráveis entre eles e que as divergências existentes podiam ser creditadas também à natural não homogeneidade do próprio material ensaiado, levando a que estes resultados pudessem ser, considerados como válidos e assim serem incluídos em todas as análises feitas nesse trabalho.

Provavelmente, a melhor aproximação seria caracterizar a estrutura do compósito como anisotrópica devido à não homogeneidade estrutural do compósito. Entretanto, para facilitar a sua caracterização mecânica por outras técnicas, o compósito foi considerado até aqui, como uma estrutura ortotrópica.

Alguns fatores que indicam as características estruturais de um material ortotrópico podem mesmo, serem observados no material estudado. Primeiro, ele é composto por fibras vegetais longas; segundo, as fibras foram acomodadas no molde, no seu sentido longitudinal e a compressão para a moldagem foi aplicada no sentido perpendicular às fibras que podem ter sofrido acomodação e certo grau de esmagamento, no mesmo sentido da carga. Como já visto, foi determinada experimentalmente, nos planos transversais ao comprimento da fibra, a existência de módulos de elasticidade, aparentemente, diferentes.

Poderá, também, ser observada a variação do módulo de elasticidade aparente em função variação da distância entre apoios.

Nos casos dos CP de Fibras Curtas, em vista de que a acomodação das fibras foi feita de forma aleatória e não direcional esta diferença não é tão evidente.

Os Módulos de Elasticidade Aparente, calculados pela Equação 37, decrescem quando se reduz a distância entre apoios, o que é esperado em vista do aumento da rigidez à flexão e também tendem a reduzir-se, claramente, ao serem ensaiados na Posição B, pelo mesmo motivo, já que há aumento na altura da seção.

Comparando-se os valores de Módulos de Elasticidade Aparente obtidos para os vãos de 114,5 mm e 265 mm, em cada posição, pode-se dizer que crescem com o aumento do vão, em torno de 19%, para os CP de Fibras Longas, na Posição A e em média 73%, para os CP de Fibras Longas, na Posição B, o que parece demonstrar o comportamento ortotrópico, nas amostras (Tabela 14).

Tabela 14 – Percentagens de crescimento de E_{ap} , com o aumento de L , CP de Fibras Longas.

Fibras Longas	CP1	CP2	CP3	CP4	Média
Posição A	21,61%	20,49%	21,43%	13,31%	19,21%
Posição B	71,36%	68,32%	78,91%	74,08%	73,17%

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Esta diferença percentual, se observada pela média entre as posições A e B, chega a ser quase quatro vezes maior, de uma posição para a outra.

Considerando, da mesma forma os CP de Fibras Curtas, observa-se que existe uma variação média de quase 10%, nos valores dos Módulos de Elasticidade

Aparente, com o crescimento da distância entre apoios, para os CP na Posição B e de 25,5%, para os CP na Posição A.

Se for considerado que a disposição das Fibras Curtas durante a moldagem foi aleatória e não direcional, parece ser possível, até aqui, afirmar que existe mesmo, um comportamento ortotrópico do material, dependente da direção do carregamento de moldagem (Tabela 15).

Tabela 15 – Percentagens de crescimento de E_{ap} , com o aumento de L , CP de Fibras Curtas.

Fibras Curtas	CP5	CP6	CP7	Média
Posição A	48,18%	32,94%	20,89%	25,50%
Posição B	5,24%	4,53%	29,76%	9,89%

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Neste caso, a diferença percentual, se observada pela média, entre as posições A e B, chega a ser quase três vezes maior. Não houvesse a propriedade ortotrópica do material talvez pudessem ser esperadas diferenças, muito menores ou mesmo, praticamente, inexistentes.

Esta constatação parece indicar também que, neste caso, poderia ter influência no Módulo de Elasticidade Aparente, a posição de compactação das fibras além da própria geometria da seção.

Também é interessante observar que os valores obtidos para os Módulos de Elasticidade Aparente neste trabalho, inserem-se nas faixas de valores obtidos por outros pesquisadores, sejam para compósitos de fibras longas ou de fibras curtas, mesmo considerando-se haver diferenças nos procedimentos de ensaio, forma de tratamento das fibras e cálculo dos resultados (Tabela 13).

5.1.3 Conclusões da primeira etapa

Foi possível desenvolver compósitos de fibras de taquara-lixo com resina epóxi. Foram preparados dois blocos, um com fibra longa (280 mm) com concentração de 56% em massa de fibra e outro bloco com fibra curta (25 mm) com concentração mássica de 54%, ambos com carga de compactação de cinco toneladas.

Nos ensaios de flexão realizados sobre os CP, as flechas em função da carga, apresentaram trechos de comportamento linear, permitindo a aplicação da Norma selecionada.

Por meio da Equação 41, foi possível por interpolação sobre os pontos experimentais determinar o Módulo de Elasticidade Aparente em função da distância entre apoios. A partir dos resultados de E_{ap} e das medidas dos CP e das distâncias entre os apoios foi construído o gráfico cartesiano $1/E_{ap}$ vs. $(h/L)^2$ e a partir da Equação 42 foi possível, por interpolação, determinar os valores do Módulo de Elasticidade Verdadeiro e do Módulo de Cisalhamento.

As médias dos Módulos de Elasticidade, ditos Verdadeiros, para os CP de Fibras Longas, ficaram em 15 500 MPa, para a Posição A e 17 700 MPa, para os CP, quando ensaiados na Posição B. A diferença entre os valores médios dos módulos foi de 14%, podendo indicar a existência da propriedade ortotrópica do compósito com fibras longas.

Os módulos de elasticidade obtidos para os CP de Fibras Curtas mostraram, respectivamente, os valores médios de 7 500 MPa e de 7 700 MPa, para as Posições A e B, ortogonais, bastante semelhantes e coerentes, se for considerado o fato de que nestas amostras a distribuição de fibras foi aleatória e não direcional. Apesar da diferença entre os módulos ser de apenas 3,1%, o resultado pode estar indicando também, possível existência da propriedade ortotrópica do compósito de fibras curtas nos planos ortogonais ao comprimento dos CP.

Foi observado que a simples mudança de uma posição de ensaio, para outra posição ortogonal à primeira, resulta em uma diferença entre planos, de 2,6 vezes para o Módulo de Elasticidade Aparente para fibras curtas e de 3,9 vezes para o de fibras longas, sugerindo terem estes compósitos um comportamento sensível à modificação na direção de moldagem.

Entretanto, pode-se questionar se uma parte destas diferenças não poderia ser devida à variação do momento de inércia dos Corpos de Prova, já que suas seções são retangulares. Uma investigação a esse respeito seria recomendável, preparando-se amostras de seção reta quadrada e avaliando-se desta forma a influência deste fator nos resultados. Essa investigação será o objeto do Capítulo 6 na sequência desse trabalho.

5.2 SEGUNDA ETAPA – APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE TIMOSHENKO, BASEADA NA TEORIA DAS VIGAS

5.2.1 Metodologia proposta

Foram utilizados neste estudo os mesmos resultados experimentais já analisados na primeira parte deste trabalho.

Entretanto, nesse tópico utilizou-se a Equação 43 para a obtenção simultânea dos Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento, chamada por simplificação, de Equação de Timoshenko. Esta equação assume, como já comentado, que a flecha de uma viga tem um componente devido ao momento fletor e outro devido à força cortante que é afetada por um fator de forma k que contempla a distribuição não uniforme das tensões de corte na seção transversal. Este fator varia com a relação h/L (XAVIER *et al.*, 2007). Neste estudo, foi permitida sua variação no cálculo de E e G .

$$f = \frac{F L^3}{48 E I} + k \frac{F L}{4 A G} \quad (43)$$

onde:

E – Módulo de Elasticidade;

G – Módulo de Cisalhamento

F – Força;

f – Flecha;

L – Distância entre apoios;

A – Área da seção reta do Corpo de Prova;

I – Momento de Inércia do corpo de Prova;

k – Fator de forma.

Os valores de E e G foram obtidos por interpolação através do aplicativo computacional KaleidaGraph, a partir dos gráficos de Força vs. Flecha apresentados anteriormente e que foram traçados para cada um dos Corpos de Prova ensaiados, para cada uma das cinco distâncias entre apoios consideradas (vãos) e nas duas posições de carregamento consideradas.

As Tabelas 16 e 17 resumem, por exemplo, os valores de **E** e **G** (em MPa), obtidos, para os corpos de prova CP1 de Fibras Longas e CP7 de Fibras Curtas, para as duas posições ensaiadas, através da Equação de Timoshenko.

Tabela 16 – Valores de **E** e **G** (MPa), para o CP1, Fibras Longas, Posições A e B.

CP1	Posição A		Posição B	
Dimensões	h=13,27 (mm)	b=22,82 (mm)	h=22,82 (mm)	b=13,27 (mm)
Vão	Módulo E	Módulo G	Módulo E	Módulo G
265	16 850	802	17 390	1 196
238	16 420	994	15 890	1 153
200	15 820	1 013	15 820	1 468
149.5	15 210	1 065	14 814	1 092
114.5	14 690	1 117	14 145	919

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Tabela 17– Valores de **E** e **G** (MPa), para o CP7, Fibras Curtas, Posições A e B.

CP7	Posição A		Posição B	
Dimensões	h=19,00 (mm)	b=15,08 (mm)	h=15,08 (mm)	b=19,00 (mm)
Vão	Módulo E	Módulo G	Módulo E	Módulo G
265	7 436	682	7 088	1 348
238	7 820	720	7 116	1 385
200	7 839	1 190	7 130	1 251
149.5	7 590	928	7 117	1 057
114.5	7 460	1 018	6 920	836

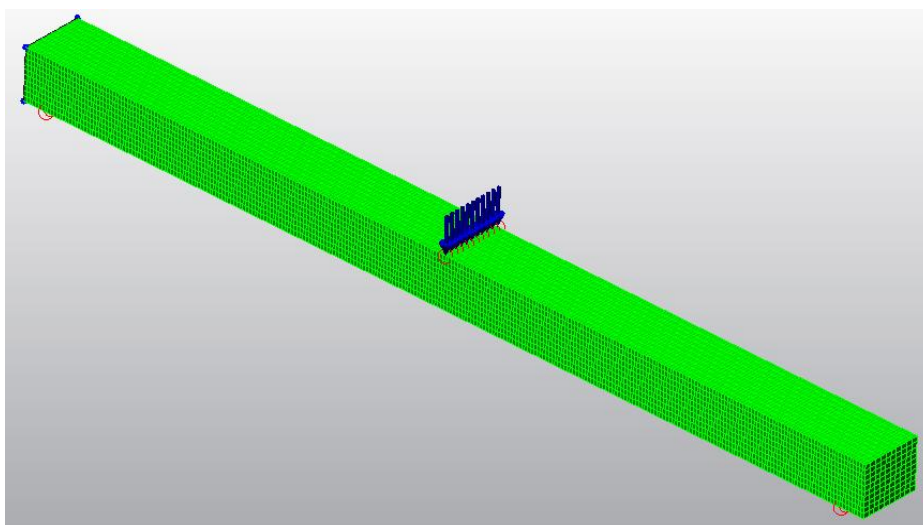
Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

5.2.2. Simulações

Utilizando-se o Programa Autodesk Simulation Multiphysics, foram efetuadas simulações numéricas dos Ensaios de Flexão de Três Pontos para cada um dos corpos de prova ensaiados, nas duas posições, para as amostras de fibras longas e de fibras curtas, reproduzindo-se suas dimensões e considerando-se o material ortotrópico. Utilizaram-se os valores dos módulos de elasticidade e de cisalhamento, calculados pelo método de cálculo aqui exposto, correspondentes às duas posições ensaiadas.

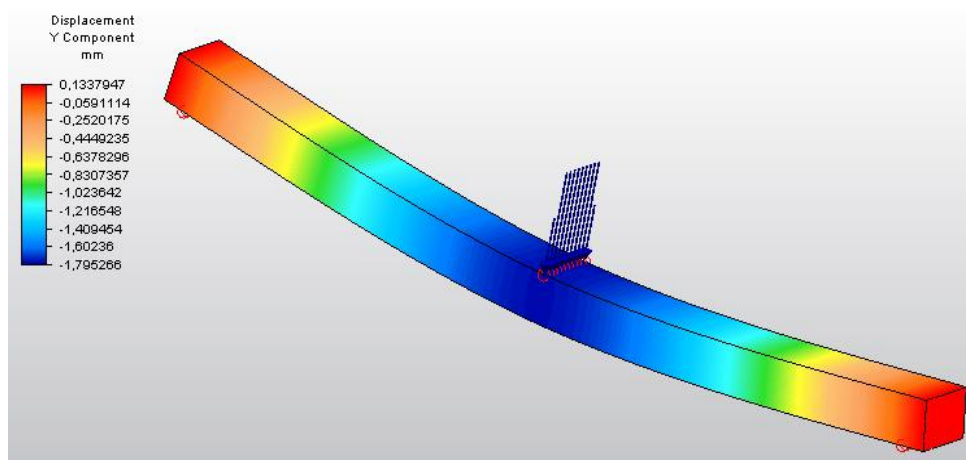
Nestas simulações, o prisma de seção retangular, representando um corpo de prova foi dividido em $2,8 \times 10^4$ elementos ($10 \times 10 \times 280$), definidos como “*element type brick*”. Foram definidas distâncias entre apoios conforme aquelas utilizadas experimentalmente, simulando-se uma viga simplesmente apoiada, com três graus de liberdade. Foram simuladas cargas concentradas de 250 N, nos nós da linha média da face superior do modelo, sendo as cargas das extremidades laterais, tomadas com valor igual a 50% das cargas internas, para correção das deformações resultantes. A Figura 43 representa um destes modelos, e a Figura 44 mostra o resultado final de uma simulação com a representação das deformações registradas.

Figura 43 – Reprodução de um Corpo de Prova para simulação numérica.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Figura 44 – Exemplo de resultado de deformações, obtido em simulação numérica de Ensaio de Flexão de Três Pontos.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

As simulações efetuadas forneceram os valores de deformação no banzo inferior de cada amostra, considerados também cada um dos cinco vãos ensaiados.

As Tabelas 18 e 19 resumem estes valores de deformação (flechas), obtidos nas simulações dos corpos de prova CP1 e CP7 e também os valores das flechas experimentais dos ensaios correspondentes, para um determinado valor de força. Foi feito o cálculo da diferença percentual entre os dois valores de flecha, para cada Corpo de Prova e cada distância entre apoios considerada.

Tabela 18 – Comparação entre Flechas Experimental e Simulada, CP1, Fibras longas, Posições A e B.

CP1	Posição A				Posição B			
Vão	Flecha Simulada (mm)	Força (N)	Flecha Exp. (mm)	Diferença (%)	Flecha Simulada (mm)	Força (N)	Flecha Exp. (mm)	Diferença (%)
265	2,700	500	2,717	-0,6	1,053	550	0,993	6,0
238	2,038	500	1,988	2,5	0,779	500	0,676	15,2
200	1,264	500	1,245	1,5	0,662	700	0,594	11,5
149,5	0,601	500	0,559	7,5	0,406	800	0,344	18,0
114,5	0,403	650	0,346	16,5	0,445	1500	0,375	18,6

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Tabela 19 – Comparação entre Flechas Experimental e Simulada, CP7, Fibras Curtas, Posições A e B.

CP7	Posição A				Posição B			
Vão	Flecha Simulada (mm)	Força (N)	Flecha Exp. (mm)	Diferença (%)	Flecha Simulada (mm)	Força (N)	Flecha Exp. (mm)	Diferença (%)
265	1,960	200	1,948	0,6	1,308	200	1,281	2,1
238	1,361	200	1,358	0,2	0,952	200	0,925	2,9
200	0,820	200	0,792	3,5	0,721	250	0,695	3,7
149,5	0,547	300	0,539	1,5	0,317	250	0,303	4,6
114,5	0,467	500	0,422	10,7	0,338	500	0,312	8,3

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Observação: Todas as tabelas de valores dos módulos calculados para todos os corpos de prova, assim como as que resumem os resultados das simulações estão disponíveis no Apêndice B deste trabalho.

5.2.3 Análise e discussão dos resultados

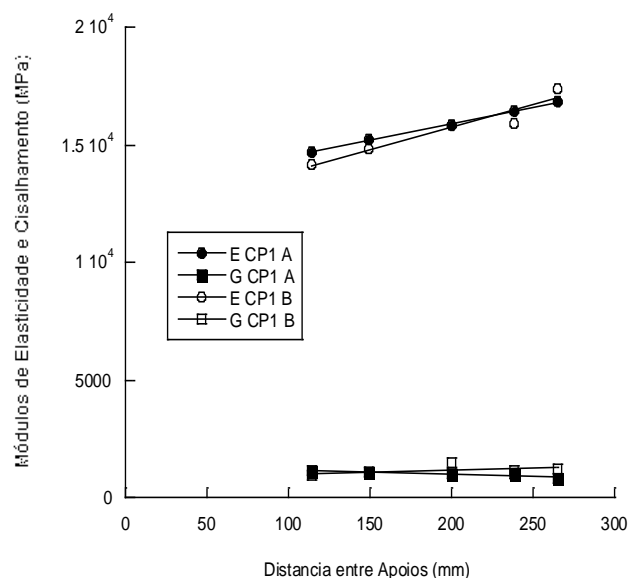
5.2.3.1 Módulos vs. Vãos

Representando-se cartesianamente os valores dos Módulos de Elasticidade (E) e de Cisalhamento (G), calculados e resumidos em tabelas como as 16 e 17, de cada corpo de prova, vs. as Medidas das Distâncias entre Apoios (L) ensaiadas, percebe-se que os pontos distribuem-se, razoavelmente bem sobre retas à medida que a distância entre apoios aumenta, mostrando que os valores destes módulos guardam relação, aproximadamente, linear com o crescimento das distâncias entre apoios, (Figuras 45 e 46).

Percebe-se que se for procurado um valor médio para E , para todos os vãos e para as duas posições ensaiadas, este valor estará próximo do obtido para o vão de 200 mm que está mais próximo, por sua vez, dos vãos maiores que dos menores. Os Módulos de Cisalhamento têm uma distribuição mais horizontal, significando uma distribuição mais próxima da mesma média, aproximando-se significativamente do

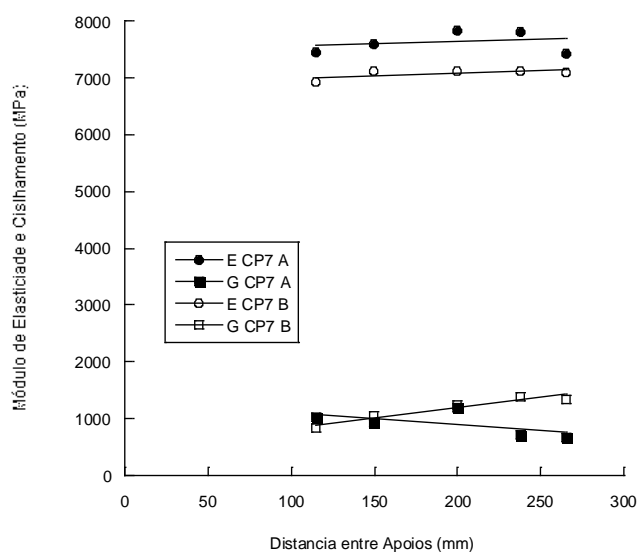
valor que se espera para o módulo de cisalhamento da matriz de resina epóxi que, de acordo com Giurgiuti *et al.*, (1995), deve estar em torno de 1 287 MPa.

Figura 45 – Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento vs. Distância entre apoios, CP1, Posições A e B.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Figura 46 – Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento vs. Distância entre apoios, CP7, Posições A e B.



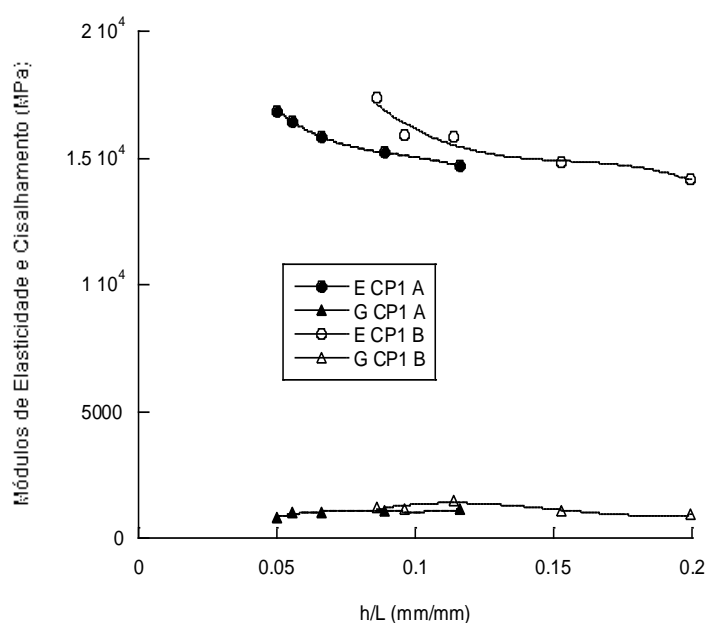
Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

5.2.3.2. Módulos vs. Razão h/L

Representando-se cartesianamente os mesmos valores dos Módulos de Elasticidade de Cisalhamento vs. a Razão h/L que é menor quanto maior for o valor de L (vão) considerado, minimiza-se a influência dimensional da seção reta das amostras na figura e percebe-se também que existe uma convergência geral dos pontos, à medida que estes valores de h/L tendem a aproximar-se ou afastar-se de “zero” (que seriam as tendências, se a distância entre os apoios pudesse aumentar ou reduzir, indefinidamente), ficando claramente defasados os módulos obtidos para vãos iguais das duas posições ensaiadas. Não havendo superposição das curvas, poder-se-ia dizer que se apresenta o efeito de ortotropia do material, para as duas posições consideradas nos ensaios, efeito que seria mais flagrante no caso dos Módulos de Elasticidade.

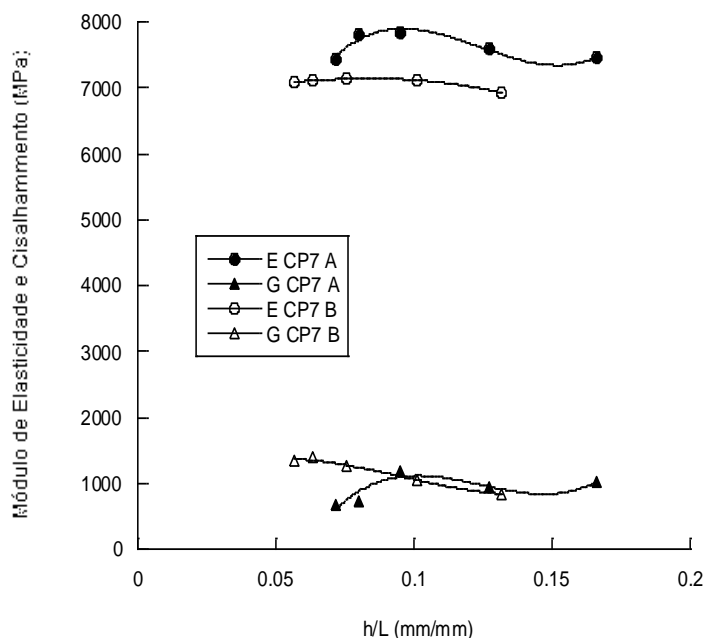
As Figuras 47 e 48 apresentam os gráficos dos Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento vs. Razão h/L , para dois dos corpos de prova ensaiados.

Figura 47 – Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento vs. Razão h/L , CP1, Fibras Longas, Posições A e B.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Figura 48 – Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento vs. Razão h/L , CP7, Fibras Curtas, Posições A e B.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

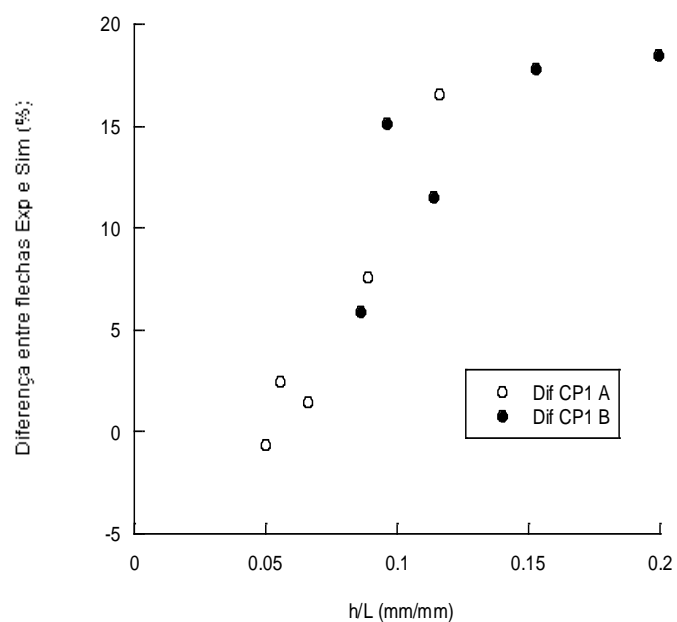
5.2.3.3. Diferenças entre Flechas Experimentais e Simuladas vs. Razão h/L

Finalmente, representando-se cartesianamente os valores das diferenças percentuais entre as flechas experimentais e as flechas simuladas (Tabelas 18 e 19), vs. Razão h/L , observa-se uma tendência de dispersão dos pontos, quanto maior seja o valor de h/L , isto é, quanto menor seja o vão considerado. É interessante observar então que os valores das diferenças percentuais também tendem a ser maiores, quanto menor é a distância entre apoios.

As Figuras 49 e 50 apresentam os gráficos de diferenças percentuais entre as flechas experimentais e simuladas vs. a Razão h/L , para dois corpos de prova ensaiados.

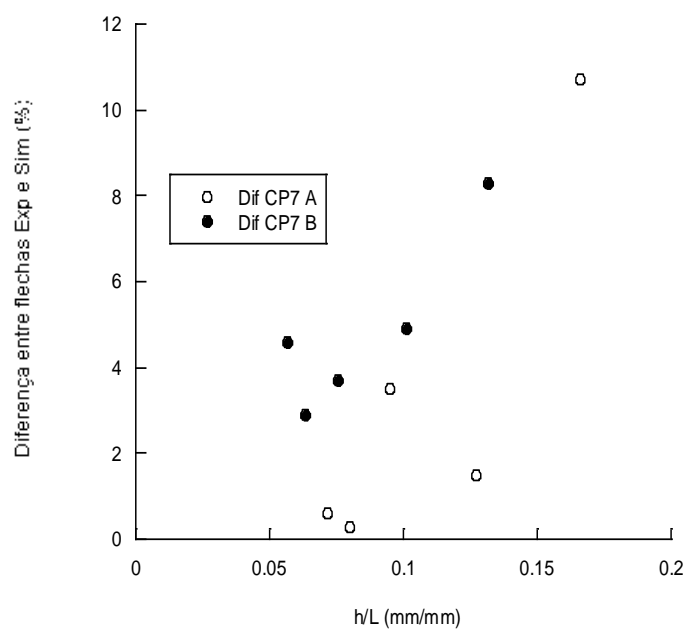
Observação: As tabelas e os gráficos, referentes a esta discussão e correspondentes a todos os corpos de prova são apresentados no Apêndice B.

Figura 49 – Diferenças entre Flechas Experimental e Simulada vs. Razão h/L , CP1, Posições A e B.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Figura 50 – Diferenças entre Flechas Experimental e Simulada vs. Razão h/L , CP7, Posições A e B.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

5.2.3.4. Considerações sobre as Normas de Referência

Entre as Normas que tratam de caracterização de amostras de materiais através de Ensaio de Flexão de Três e de Quatro Pontos, verifica-se que as mesmas têm entre suas prescrições mais importantes, a definição da Razão entre o vão (L) e a altura da seção (h) dos Corpos de Prova (L/h). Assim, a ABNT - NBR 7190 que trata de Projetos de Estruturas de Madeira recomenda a relação $L \geq 21 h$. A Norma ASTM D790 – 2010 que trata da Padronização de Métodos para obtenção de propriedades flexionais de plásticos reforçados e não reforçados e de materiais elétricos insulados recomenda a relação $L \geq 16 h$. A Norma ASTM D7264 / D7264M – 2007 que trata de Padronização de Métodos de Ensaio para obtenção de propriedades flexionais de compósitos de matrizes poliméricas recomenda a relação $L \geq 32 h$. Já a Norma ASTM D198 – 2013 que trata de Padronização de Métodos de Ensaio de testes estáticos de madeira bruta em dimensões estruturais e serve de apoio normativo neste trabalho recomenda a relação mínima de $L \geq 12 h$.

O que determina a recomendação destas relações mínimas entre o vão de ensaio e altura da seção do corpo de prova é a necessidade de minimizar a influência do efeito de cisalhamento nos resultados obtidos nos ensaios de flexão o que é obtido pelo aumento da distância entre apoios e destes para o ponto de aplicação até a carga de ensaio. Ao se considerarem as determinações destas normas e ainda que as diferenças percentuais de resultados de deformação entre as simulações feitas e os experimentos executados foram maiores para aqueles vãos de 200 mm, 149,5 mm e 114,5 mm e que nos ensaios executados, apenas os vãos maiores (265 mm e 238 mm) atendem com maior aproximação àquelas recomendações (ver discussão no item 5.1.2), pode-se concluir que os valores de E e G obtidos para estes vãos ensaiados maiores, devem ser aqueles que mais devem se aproximar dos valores reais esperados para o compósito pesquisado.

5.2.3.5 Critério de cálculo para os Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento

Tendo em vista o acima exposto, foram recalculadas as médias dos valores obtidos em todos os ensaios, selecionando-se apenas aqueles em que as distâncias entre apoios eram de 265 mm e 238 mm.

As Tabelas 20 e 21 resumem estes valores de **E** e **G**, para as Posições A e B dos Compósitos de Fibras Longas e Curtas, respectivamente, calculados pelo procedimento que aplica a Equação 39, de Timoshenko, para os vãos 265 mm e 238 mm.

Tabela 20 - Médias dos valores dos módulos de elasticidade e de cisalhamento, considerando apenas os valores obtidos pela aplicação da Equação da Teoria das Vigas de Timoshenko, para os vãos 265 mm e 238 mm, consideradas as posições A e B, em Compósitos de Fibras Longas.

CP	E/A – TIMOSH. (MPa)	G/A – TIMOSH. (MPa)	E/B – TIMOSH. (MPa)	G/B – TIMOSH. (MPa)
CP1	16 635±215	898±96	16 649±750	1 174,5±22
CP2	16 085±195	913±8	15 760±480	995±3
CP3	14 870±110	1 028±50	14 469±251	1 061±8
CP4	14 263±276	892±12	16 890±70	1 002 ±83
MEDIA FL	15 463±365	932±29	15 940±399	1 058±32

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Tabela 21 - Médias dos valores dos módulos de elasticidade e de cisalhamento, considerando apenas os valores obtidos pela aplicação da Equação da Teoria das Vigas de Timoshenko, para os vãos 265 mm e 238 mm, consideradas as posições A e B, em Compósitos de Fibras Curtas.

CP	E/A – TIMOSH. (MPa)	G/A – TIMOSH. (MPa)	E/B – TIMOSH. (MPa)	G/B – TIMOSH. (MPa)
CP5	6 356±36	634±2	7 040±14	1 140±71
CP6	7 056±06	1 126±54	7 530±50	1 258±192
CP7	7 102±14	1 366±18	7 628±192	701±19
MEDIA FC	6 838±153	1 042±137	7 399±126	1 033±120

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Esses valores de Módulos de Elasticidade de Cisalhamento médios, calculados para compósitos de fibras longas e de fibras curtas, nas duas posições que consideram a direção de compressão de moldagem e que parecem definir a

ortotropia das amostras, devem ser assim, aqueles que melhor definem, por esse método de cálculo, as características mecânicas procuradas.

5.2.4 Conclusão da segunda etapa

Concluindo a segunda etapa desta primeira parte do trabalho experimental, pode-se resumir que em todos os ensaios foi possível identificar um trecho, aproximadamente, linear nos gráficos de Força vs. Flecha.

Nas regiões lineares identificadas em cada curva, por interpolação da Equação 37, de Timoshenko, foi possível calcular, simultaneamente, os valores para os Módulos de Elasticidade (E) e de Cisalhamento (G), neste caso considerando-se k , o Fator de Forma, variável.

Os resultados obtidos mostraram alguma dispersão que pode ser creditada à falta de homogeneidade do compósito, tendo em vista o próprio processo de manual de distribuição de fibras nas amostras.

Também, foi possível observar, que na maioria dos gráficos construídos, parece que há diferenças coerentes nos valores dos módulos, considerando-se a direção de compressão de moldagem dos blocos. No sentido da compactação, os módulos de elasticidade são menores do que os verificados no sentido transversal à compressão de 5 tf. Com isso, foi possível concluir que nos planos ortogonais analisados o comportamento deve ser ortotrópico, tanto para os compósitos de fibras longas e como para os de fibras curtas.

Comparando-se as flechas experimentais com flechas de simulações numéricas efetuadas, observou-se que quanto menores as distâncias entre apoios consideradas, maiores divergências percentuais, entre elas ocorriam.

Concluiu-se assim que os valores obtidos para os dois maiores vãos ensaiados e que melhor se enquadravam na relação $L \geq 12 h$ deveriam ser os mais representativos para os parâmetros pesquisados.

Comparando-se os resultados obtidos até aqui, neste trabalho, em que se utilizaram fibras de taquara-lixo sem tratamento químico de nenhuma espécie, com resultados obtidos por outros autores, observou-se que os Módulos de Elasticidade para este material são em média 24% menores do que aqueles obtidos para fibras

longas tratadas com NaOH e 16% menores para fibras curtas tratadas, (REIS, 2013).

Percebe-se que o tratamento químico das fibras tem mais influência para os compósitos de fibras longas, indicando que influencia no sistema de adesão matriz-fibra.

Em ordem de grandeza, os valores médios obtidos para Módulos de Elasticidade para compósitos de fibras longas giram em torno de 15 500 MPa e 7 000 MPa, para compósitos de fibras curtas. O Módulo de Cisalhamento, para os dois tipos de Compósitos, atinge valores da ordem de 1 000 MPa parecendo tender ao Módulo de Cisalhamento da própria matriz de resina epóxi.

Observa-se também que a relação entre módulos de elasticidade e de cisalhamento aceita, normalmente, para a madeira é de $G = 7\% E$ (Pfeil e Pfeil, 2003). No caso do compósito estudado de matriz de resina epóxi e fibra longa de taquara-lixá, esta relação também se verifica, com grande aproximação, sendo de $G = 6,4\% E$. Isso pode indicar que o comportamento mecânico do compósito estará bastante próximo do comportamento da madeira, para utilização como material de construção.

E, finalmente, tendo como referência o que foi observado por outros autores, pode-se dizer também que o ganho nas propriedades mecânicas das fibras tratadas, parece não justificar os problemas e os custos causados pela necessidade de correta disposição dos efluentes resultantes dos tratamentos químicos (OSÓRIO *et al.*, 2011).

5.3 TERCEIRA ETAPA - SIMULAÇÕES DE UMA VIGA SANDUÍCHE CONFORME CORPO DE PROVA ENSAIADO

5.3.1 Descrição do experimento

Preparou-se, um corpo de prova em forma de viga-sanduíche, moldado em duas fases. A primeira fase, correspondente às faces superior e inferior, foi moldada como compósito de matriz de resina epóxi, reforçado com fibras longas alinhadas, de 280 mm. A quantidade de fibras longas foi calculada de modo que fração

volumétrica fosse de aproximadamente 56% de fibras e se obtivesse para estas faces (superior e inferior) uma espessura compactada em torno de 5,0 mm e não superior a 5,5 mm (Figura 51).

Figura 51 – Colocação da primeira camada de fibras longas (face inferior).



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

A segunda fase ou núcleo foi moldada com compósito de matriz de resina epóxi reforçado com fibras curtas de 25 mm, distribuídas, aleatoriamente e a quantidade de fibras foi calculada para que se obtivesse a fração volumétrica de aproximadamente 54% e espessura média de 10 mm e nunca superior a 12 mm. Foi aplicada uma carga de moldagem de 5,0 tf (Figura 52).

A adoção do comprimento de 25 mm, para as fibras curtas, foi baseada nos resultados obtidos por Reis (2013) em ensaios de “*Pull-out*”, em fibras de taquaralixa tratadas quimicamente e matriz de resina epóxi, quando obteve o valor de $L_c = 13,4$ mm. O dobro deste valor configura em média, o valor de melhor aproveitamento da resistência ao cisalhamento na interface fibra-matriz.

Observa-se que um ensaio de “*Pull-out*” feito especificamente para fibras não tratadas em matriz de resina epóxi, deveria obter valores um pouco maiores de L_c .

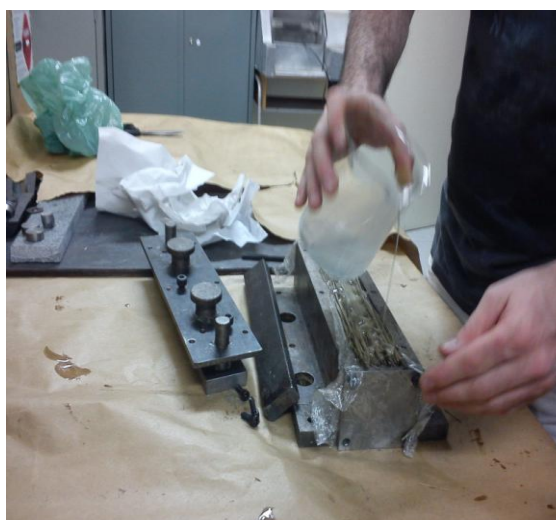
Figura 52 – Colocação da segunda camada. Fibras curtas aleatórias (núcleo).



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Finalmente, foi colocada a camada correspondente à face superior de fibras longas e alinhadas, com as mesmas características da camada inferior (Figura 53).

Figura 53 – Colocação de resina epóxi sobre a última camada de fibras longas alinhadas (face superior).



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

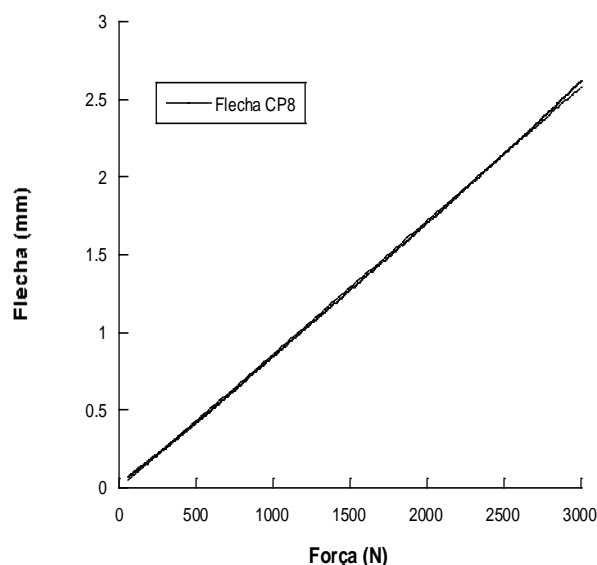
Os equipamentos utilizados e os materiais, procedimentos de preparo, desmoldagem e cura adotados, foram, rigorosamente, os mesmos utilizados na preparação dos corpos de prova dos compósitos já descritos, anteriormente, neste

trabalho, tendo-se como objetivo a possibilidade de comparação racional dos experimentos.

O bloco em forma de viga-sanduiche foi submetido ao ensaio de flexão de três pontos, na mesma prensa universal EMIC DL30000, descrita anteriormente, com célula de carga de 1000 N, com velocidade de deslocamento 1 mm/minuto, sendo a distância entre os apoios de 265 mm e utilizando-se para leitura das deformações (flechas), um deflectômetro eletrônico, acoplado ao sistema de leitura da prensa, posicionado, inferiormente, ao corpo de prova, em posição intermediária aos apoios.

Os resultados obtidos foram lançados em um gráfico cartesiano, Força Aplicada vs. Deformação (Flecha). A Figura 54 representa a parte linear selecionada deste gráfico, com correção para a origem:

Figura 54 – Gráfico para o Ensaio de Flexão da Viga-Sanduiche.



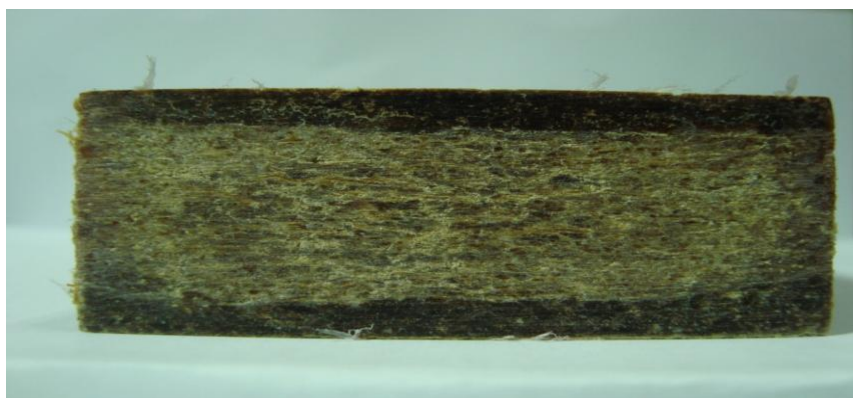
Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

O aplicativo KaleidaGraph foi utilizado para o tratamento dos dados experimentais.

A Figura 55, extraída de BOM *et al.*, (2011), mostra uma seção de um corpo de prova, em forma de viga-sanduiche, semelhante ao que se preparou, onde se identificam as faces e o núcleo de materiais compósitos de matriz de resina epóxi reforçados com fibras de taquara-lixá. A imagem é interessante pois nessa amostra

o processo de corte proporcionou, acidentalmente, a clara diferenciação entre as fases componentes (faces e núcleo).

Figura 55 – Imagem ilustrativa de uma seção de corpo de prova, em forma de viga-sanduíche, onde se identificam as faces e o núcleo de materiais compósitos de matriz de resina epóxi reforçados com fibras de taquara-lixá.



Fonte:(BOM *et al.*, 2011).

5.3.2 Simulações da viga-sanduíche

Utilizando-se o Aplicativo Autodesk Simulation Multiphysics, que utiliza o Método dos Elementos Finitos, foram feitas simulações de vigas-sanduíche com o objetivo de avaliar a qualidade dos valores de Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento obtidos neste trabalho.

O modelo de malha utilizado nessa análise estrutural utilizou o elemento da forma “*Brick*”, sendo as faces divididas em (10 x 4) elementos e o núcleo em (10 x 8) elementos e o comprimento dividido em 56 segmentos de 5 mm na direção *x*, totalizando assim, 8 960 elementos. O modelo utilizado no aplicativo foi ortotrópico, elemento centralizado tipo “*static stress with linear material models*”.

A viga foi simulada com 280 mm de comprimento e apoios simétricos distantes de 265 mm, com restrição de um grau de liberdade aplicada na direção longitudinal. As propriedades físicas do compósito sanduíche nas faces e no núcleo foram consideradas ortotrópicas, conforme os valores obtidos pelos métodos de cálculo acima descritos, para os compósitos de fibras longas (faces) e curtas (núcleo), nas posições A e B, ortogonais, em relação à direção de compressão na

moldagem dos corpos de prova. Foi adotado o Módulo de Poisson igual a 0,3 para todos os compósitos (consoante considerações teóricas do item 3.1, alínea c).

Para efeito de comparação foi adotada a carga de 3 000 N e o deslocamento de 2,1296 mm, (aproximado para 2,13 mm), obtido no ensaio experimental.

A viga-sanduíche foi simulada com as seguintes dimensões externas: 280 mm x 50,08 mm x 20,42 mm, semelhante às medidas com paquímetro, diretamente no bloco experimental moldado.

Tendo em vista a dificuldade de se identificarem com exatidão as superfícies de separação entre o compósito de fibras longas das faces e o compósito de fibras curtas do núcleo da viga-sanduíche (Figura 55), foram feitas duas considerações dimensionais:

1. Medida direta com paquímetro, estimando visualmente a posição da superfície de separação entre as camadas (5,0 x 10,42 x 5,0 mm);
2. Cálculo por análise volumétrica das proporções de materiais envolvidos na preparação da amostra (4,86 x 10,70 x 4,86 mm), (Tabela 22).

Tabela 22 – Dimensões Utilizadas nas Simulações de Vigas-Sanduíche.

Dimensões	Faces t_f (mm)	Núcleo t_c (mm)	Espessura Total (mm)	Largura b (mm)	Comprimento (mm)	Vão L (mm)
1 Direta	5,00	10,42	20,42	50,08	280	265
2 Proporcional	4,86	10,70	20,42	50,08	280	265

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

A carga de ensaio simulada foi aplicada na direção paralela à direção do carregamento de moldagem do bloco. A distância entre os apoios do experimento real foi de 265 mm, vão este que foi também o adotado em todas as simulações.

Os valores médios dos módulos de Elasticidade e de Cisalhamento obtidos pelos procedimentos descritos nas etapas anteriores foram utilizados, conforme mesmas direções A e B ortogonais e relacionadas com a direção do carregamento de moldagem dos corpos de prova (Tabela 23). Foi adotado o valor de 0,3 para o Módulo de Poisson.

Tabela 23 – Resumo dos parâmetros utilizados nas simulações de Vigas-Sanduíche.

Valores Médios dos Módulos de Elasticidade e Cisalhamento					
Método de Cálculo	Comprimento da Fibra	E/A (MPa)	G/A (MPa)	E/B (MPa)	G/B (MPa)
ASTM D-198	Longa	15 516	1 169	17 680	870
ASTM D-198	Curta	7 463	596	7 696	1 690
TIMOSHENKO	Longa	15 463	933	15 940	1 058
TIMOSHENKO	Curta	6 838	1 043	7 399	1 033

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

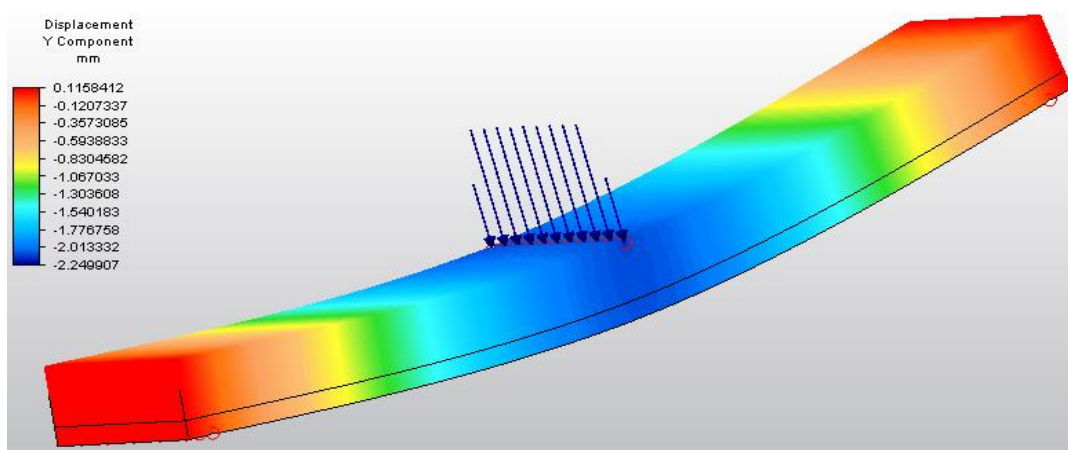
Foram então feitas quatro simulações considerando as quatro possibilidades que se apresentavam.

5.3.3 Estudo comparativo das deformações simuladas e experimentais

Os resultados de deformação destas simulações foram comparados com os resultados de deformação verificados no experimento real, feito com o Corpo de Prova descrito.

A Figura 56 mostra um exemplo de resultado de deformações em uma simulação de viga-sanduíche.

Figura 56 – Exemplo de resultado de simulação de uma Viga-Sanduíche.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Os resultados das deformações das simulações (flechas), comparados com a flecha experimental medida ($f_e = 2,13$ mm), considerando-se as quatro possibilidades analisadas, permitiram o cálculo das diferenças percentuais resumidas na Tabela 24.

Tabela 24 – Diferenças entre a Flecha Experimental ($f_e = 2,13$ mm) e as Simuladas.

Medidas	(mm)	1	2
Diferenças	(%)	Direta	Proporcional
ASTM D-198		2,04 mm	2,06 mm
		4,4%	3,4%
TIMOSHENKO		2,11 mm	2,12 mm
		1,0%	0,5%

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

5.3.4 Resultados e Discussão deste Estudo

Constatou-se que a diferença percentual entre as flechas experimentais e simuladas deste experimento ficou em torno dos 4%, quando aplicados os valores de Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento obtidos pelo método ASTM 198D - 2013 (Método dos Vãos Variáveis). Quando aplicados os valores obtidos pelo método Timoshenko, aquela diferença ficou em torno de 1%, na pior situação.

Isto permite que se aceite que os valores de **E** e **G** utilizados nas simulações são bastante coerentes com os valores reais, podendo assim estes procedimentos propostos, em que pese terem sido desenvolvidos, originalmente, para ensaios de peças de madeira, serem tomados como base metodológica para avaliação de compósitos de matrizes poliméricas reforçadas com fibras vegetais.

5.3.5 Estudo comparativo da Rigidez Flexional da Viga-sanduíche

Relembrando o que foi visto, anteriormente, quando se estabeleceu que no sistema “sanduíche”, assim como em um perfil “I”, a rigidez de flexão ou flexional **D**, aumenta com a espessura (ou altura) do núcleo ou alma e é dada pela Equação (29):

$$D = E.I \quad (29)$$

onde E é o Módulo de Elasticidade e I é o Momento de Inércia da seção reta do elemento analisado.

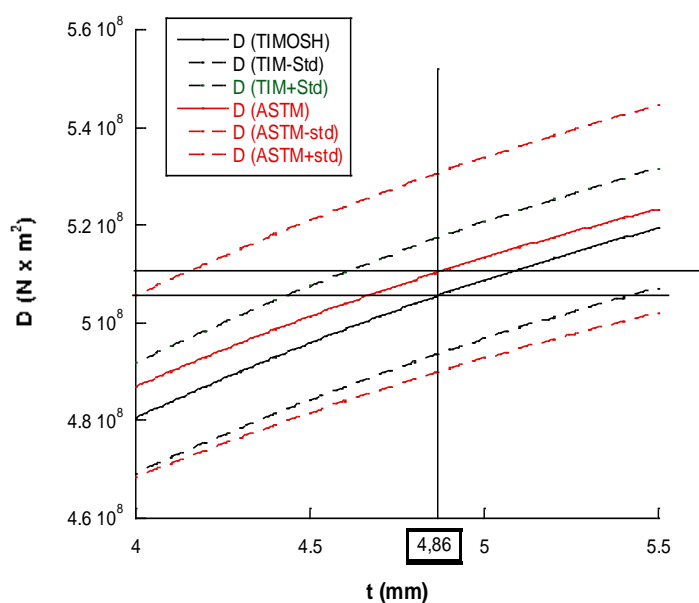
Mas, a rigidez flexional também pode ser expressa pela Equação (30), anteriormente apresentada, como segue abaixo:

$$D = \frac{E_f b t_f^3}{6} + \frac{E_f b t_f d^2}{2} + \frac{E_n b t_c^3}{12} \quad (30)$$

Utilizando-se o aplicativo KaleidaGraph, com os valores dos Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento obtidos pelos dois métodos analisados neste trabalho, resumidos na Tabela 23, calcularam-se, aplicando-se a Equação 30, valores para a Rigidez Flexional nas duas situações distintas: para os valores da ASTM D198 - 2013 e para os valores de Timoshenko. Calcularam-se também os Erros Padrões das Estimativas (Erros “*Standard*”), para todos os valores.

Coordenando-se cartesianamente todos estes valores de D com a espessura “ t ” da face da viga sanduiche, considerando a variação dessa espessura, entre 4,0 e 5,5 mm, obteve-se o seguinte Gráfico de D vs. t (Figura 57):

Figura 57 – Gráfico comparativo D vs. t .



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Em vermelho, traçaram-se os valores de D e os respectivos erros “*standard*”, calculados com os valores de Módulos de Elasticidade, para os compósitos de fibras longas e fibras curtas, obtidos pelo Método ASTM D198 - 2013 e em preto traçaram-se os valores de D e os respectivos erros “*standard*”, calculados com os valores de Módulos de Elasticidade, para os compósitos de fibras longas e fibras curtas, obtidos pelo Método da Equação de Timoshenko.

5.3.6 Análise e discussão dos resultados deste estudo

A linha vertical traçada na Figura 58, pelo valor de espessura média de face 4,86 mm, ao cruzar as curvas D (ASTM) e D (Timoshenko), determina, por uma linha horizontal, no eixo das ordenadas os valores esperados da Rigidez Flexional, se procurados por um destes dois métodos. A diferença percentual é de menos de 1%, entre eles.

É interessante observar que os valores de Rigidez Flexional obtidos pelo método ASTM são mais altos e têm dispersão na faixa de erros “*standard*” que envolvem totalmente os valores de D , obtidos através da equação de Timoshenko (Equação 39), incluindo também a faixa de erros “*standard*” destes valores.

Isto mostra que se é aceitável que os valores dos Módulos de Elasticidade e por extensão, os dos Módulos de Cisalhamento calculados pelo método ASTM D198 - 2013, são bem representativos, tendo em vista as pequenas dispersões (em torno de 4%) observadas na comparação dos resultados de deslocamento fornecidos pelas simulações pelo Método dos Elementos Finitos, em relação aos valores medidos experimentalmente, então pode-se concluir que aqueles valores, obtidos pelo Método da Equação de Timoshenko, calculados sobre ensaios experimentais em ao menos dois vãos que atendam a exigência de $L \geq 12 h$, devem ser mais precisos que os anteriores, já que estão muito próximos daqueles valores obtidos com o anteriormente citado método, que estão (incluindo a própria faixa de erros “*standard*”), dentro da faixa de erros “*standard*” daqueles e ainda levam à menores diferenças (menos de 1%), nos valores resultantes de deformação entre a simulação por Elementos Finitos e os resultados do experimento físico, em um corpo de prova em forma de viga sanduíche.

5.3.7 Conclusão desta etapa

Os resultados apresentados permitem concluir nessa etapa que os valores dos Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento para compósitos, obtidos pelos dois métodos analisados levam a valores de flechas simuladas muito próximos da realidade experimental, pois as diferenças percentuais de até 4,4% são ainda aceitáveis, do ponto de vista da engenharia civil, tendo em vista os coeficientes de segurança que envolvem os cálculos estruturais.

Os valores para os Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento obtidos através do método que chamamos de Timoshenko são mais acurados do que aqueles obtidos pelo método proposto na norma ASTM D198 – 2013.

O fato de as diferenças percentuais serem, sensivelmente (três vezes) maiores, entretanto, não invalida o método proposto pela ASTM (Norma ASTM D198 - 2013), mesmo considerando-se o fato de que esta norma, especificamente, é proposta para ensaios de peças de madeira e não de materiais poliméricos artificiais.

Por ser de mais fácil aplicação, cálculo e análise, o Método que emprega a equação de Timoshenko, para apenas dois vãos que atendam a exigência de $L \geq 12h$, pode ser usado como Método de Cálculo Padrão, já que parece oferecer boas garantias de conduzir a valores de Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento bastante realistas, conforme visto.

Como conclusão desta etapa, define-se que poderá ser este, então, o método a ser utilizado na sequência desta tese.

6 APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO PARA DETERMINAÇÃO DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE E DE CISALHAMENTO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ EPÓXICA REFORÇADOS COM FIBRAS DE TAQUARA-LIXA – SEGUNDA PARTE EXPERIMENTAL

6.1 INTRODUÇÃO

Pesquisas anteriores mostraram que as propriedades mecânicas de compósitos de matrizes de resina epóxi, reforçados com fibras de taquara-lixá, variam com a fração volumétrica de fibras, com o comprimento das mesmas, como também com sua disposição na matriz (REIS, 2013).

Nesta segunda parte do trabalho, aplicou-se o método de cálculo descrito anteriormente, em que foi utilizada a equação das vigas de Timoshenko, para o cálculo simultâneo dos Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento, de compósitos de matriz de resina epóxi reforçada com fibras de taquara-lixá, preparados segundo diferentes frações volumétricas e ainda, com diferentes comprimentos de fibras e alinhamentos em relação ao eixo do molde, com o objetivo de comprovar estas variações e ainda mais, avaliar os resultados obtidos sob a luz do método de cálculo proposto.

Outro objetivo seria avaliar nesta oportunidade a influência da forma da seção reta dos corpos de prova nos resultados obtidos, tendo em vista ser o momento de inércia da seção um dos fatores componentes da equação utilizada, porquanto paira dúvida se a característica ortotrópica detectada não estaria sendo de algum modo influenciada pela forma retangular dos corpos de prova até então ensaiados.

O preparo dos materiais necessários para a segunda parte experimental foi realizado no Laboratório de Polímeros do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR.

Os Ensaio de Flexão de Três Pontos foram realizados no Laboratório de Materiais e Estruturas – LAME, do LACTEC/UFPR.

O molde, os procedimentos de moldagem dos blocos, os procedimentos de preparação das fibras de taquara-lixá sem tratamento químico e de obtenção dos corpos de prova foram os mesmos já descritos nas etapas anteriores deste trabalho (item 4.6).

Assim, foram preparados quatro blocos diferentes de compósitos os quais foram submetidos a ensaios de flexão de três pontos. Os resultados serão apresentados e discutidos na sequência.

6.2 MATERIAIS UTILIZADOS

6.2.1 Matriz de resina epóxi

Foi utilizada nessa segunda parte do procedimento experimental do trabalho, como matriz polimérica, na elaboração de todos os blocos de compósitos a Resina Epóxi DER 324, fabricada pela Dow Química, adicionada de Endurecedor/Catalisador 201, do mesmo fabricante, na proporção de 13%, em peso. Os produtos foram pesados, separadamente e adicionados, imediatamente, antes de sua aplicação, com mistura manual durante 3 minutos, garantindo-se com isso a homogeneização da mistura.

A Tabela 25 apresenta um quadro comparativo de produtos epoxídicos utilizados nas duas partes experimentais do trabalho.

Tabela 25 – Quadro comparativo entre os produtos epoxídicos utilizados nas duas partes do trabalho.

Parte	Produto	Viscosid. à 25 °C (cP)	Equiv. Epoxi (gel/eq)	Peso Específ. (g/cm ³)	Cor (Gardner)	Endurecedor	Proporção de Endurecedor	Tempo de Gel (min)	Fabric.
1ª Parte	ARALDITE GX 251 (1)	1,35 a 1,60	229 a 238	1,12	≤ 2	ARADUR 956-2	15%	80	Huntsman Adv. Prod.
2ª Parte	D.E.R 324 (2)	0,60 a 0,80	195 a 204	1,10	≤ 1	201	13%	24	Dow Quím.

(1) Resina com boa flexibilidade, modificada com plastificante não reativo;

(2) Resina líquida epóxi de baixa viscosidade, modificada com diluente reativo monofuncional.

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

6.2.2 Fibras de taquara-lixá

As fibras de taquara-lixá, utilizadas na confecção de todos os blocos, foram preparadas conforme o processo desenvolvido pelo grupo de pesquisa, na UDESC/Joinville e descrito anteriormente.

6.3 EQUIPAMENTOS DE LABORATÓRIO UTILIZADOS

6.3.1 Prensa hidráulica

Foi utilizada para compressão durante a elaboração dos blocos uma Prensa Hidráulica com Aquecimento, marca SOLAB, do Laboratório de Polímeros do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR. Observação: neste trabalho sua utilização foi feita a frio (Figura 58).

Figura 58 – Prensa hidráulica com aquecimento. Lab. Polímeros do DEMEC da UFPR.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

6.3.2 Máquina Universal de Ensaio

Foi utilizada uma Máquina Universal de Ensaio, eletromecânica e microprocessada, marca EMIC DL10000, com célula de carga de 200 kgf, Pertencente ao LAME (LACTEC/UFPR), (Figura 59).

Figura 59 – Máquina Universal de Ensaios EMIC DL10000, do LAME (LACTEC/UFPR).



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

6.3.3 Deflectômetro EMIC EE05

Foi utilizado, também, nesta segunda parte do procedimento experimental, um Deflectômetro EE05, marca EMIC, para medição de pequenas deformações, em corpos de prova submetidos a flexão, com braço sensor em “*cantilever*”, com resolução de 0,001 mm, para deformação máxima de 12,5 mm, acoplado ao programa de leitura de dados da Máquina Universal EMIC DL 10000, ambos pertencentes ao LAME (LACTEC/UFPR), (Figura 60).

Figura 60 – Deflectômetro Eletrônico EMIC EE05, do LAME (LACTEC/UFPR).



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

6.3.4 Estufa

Foi usada uma estufa microprocessada de secagem, com “*timer*”, marca CALLMEX, com temperatura mínima de 50 °C e precisão do sistema de ± 5 °C. do Laboratório de Polímeros do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR.

6.3.5 Balanças

Foram utilizadas uma Balança Digital Toledo, com carga máxima de utilização de 3 kgf x 1 gf e carga mínima de 25 gf, para pesagem das fibras e blocos e uma Balança Eletrônica marca BIOPRECISA FA2104N, com precisão de leitura de 0,1 e desvio padrão de repetibilidade de 0,0002 com erro linear de 0,0005, para pesagem dos polímeros.

6.3.6 Guilhotina

Para o corte das fibras de taquara-lixá foi utilizada uma Guilhotina de Encadernação, marca ESPIRATEC, do Laboratório de Polímeros do DEMEC/UFPR.

6.4 DESCRIÇÃO DOS BLOCOS DE COMPÓSITOS PREPARADOS

Com o objetivo de se analisarem as variações nas propriedades mecânicas de compósitos de matriz de resina epóxi reforçados com fibras de taquara-lixá, prepararam-se quatro blocos de compósitos com diferentes frações volumétricas, comprimentos, assim como, formas de distribuição das fibras em relação ao eixo dos blocos. Foram preparados, desta forma, os seguintes blocos de compósitos:

a) Bloco 1

Bloco de compósito preparado com 270 g de fibras tratadas mecanicamente, cortadas com 280 mm de comprimento e dispostas, longitudinalmente, em relação ao eixo do bloco.

A moldagem do bloco foi feita de modo semelhante ao relatado anteriormente e assim, após a acomodação das fibras conforme o procedimento já descrito, o molde

foi levado a uma prensa e submetido a uma carga de 5 tf, durante 24 horas (Figura 61).

Figura 61 – Compressão de moldagem do Bloco 1.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Após a desmoldagem o bloco foi pesado e colocado em estufa a 80 °C, também por 24 horas.

Após a moldagem, o Bloco 1 pesou 477 gf, ficando com 56,60% m/m de fibras e peso específico de 1,099 gf/cm³ (Tabela 25).

Deste bloco foram extraídos, em serra circular de precisão, 6 (seis) corpos de prova de seção, aproximadamente, quadrada (Figura 62).

Figura 62 – Corpos de prova de fibras longas, 5 tf.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

b) Bloco 2

O bloco 2 foi preparado com 290 g de fibras longas de 280 mm, tratadas mecanicamente, também dispostas longitudinalmente, no molde.

As fibras foram acomodadas no molde, em 3 camadas sucessivas, de igual peso sendo embebidas gradativamente com a mistura epóxi de modo a se obter uma perfeita imersão das fibras, inclusive com socaria manual e compressão em prensa, a partir da acomodação da segunda camada de fibras.

Após a acomodação da terceira camada, o bloco foi levado à prensa hidráulica e comprimido até a carga de 7 tf, mantendo-se assim até sua estabilização e a seguir, por mais 24 horas. Com o aumento da carga de moldagem pretende-se aumentar a fração volumétrica de fibras.

Decorrido esse prazo foi feita a desmoldagem e em seguida a pesagem do mesmo. Na sequência, o bloco foi colocado em estufa, com temperatura de 80 °C, por 24 horas, para complementação de sua polimerização.

Findo este prazo, o bloco foi submetido à limpeza e desbaste cuidadoso, removendo-se rebarbas e praticamente todo o filme de polietileno que tinha a finalidade de facilitar a desmoldagem.

Após a moldagem o Bloco 2 mediu 446,18 cm³, pesou 458 gf, ficou com 63,3% m/m de fibras e peso específico de 1,027 gf/cm³ (Figura 63 e Tabela 26).

Figura 63 – Aspecto do Bloco 2, após a moldagem.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Deste bloco, foram extraídos, em serra circular de precisão, 6 (seis) corpos de prova de seção, aproximadamente, quadrada e comprimento de 280 mm (Figura 64 e Tabela 26).

Figura 64 – Corpos de prova de fibras longas, 7 tf.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

c) Bloco 3

Para o preparo do bloco 3, foram preparadas e cortadas 180 g de fibras com comprimento de 47 mm. As fibras foram secas em estufa a 100 °C, durante 24 horas após o que foram envolvidas em sacos de polietileno duplo por 12 horas para terem sua temperatura em equilíbrio com a temperatura ambiente. O procedimento de moldagem exigiu preparação especial tendo em vista a necessária forma de colocação manual cuidadosa, no molde (Figura 65).

Figura 65 – Preparo de operação de colocação das fibras no molde.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

O processo de moldagem do bloco consistiu na colocação de fibras, em camadas distribuídas, cuidadosamente, para que as fibras cortadas mantivessem sua posição perpendicular ao eixo do molde, sendo a mistura de polímero derramada sobre elas, com socaria por pilão de aço, até que o volume do material não fosse mais contido pelo molde (Figura 66).

Figura 66 – Colocação das fibras transversais, no molde.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Nesse ponto era colocada a tampa do molde e feita uma compressão com a prensa hidráulica até que pela compactação, o volume de material permitisse nova colocação de fibras e de mais polímero.

Quando todo o material preparado foi acomodado no molde, o mesmo foi levado uma última vez à prensa, onde foi submetido a uma carga de até 5 tf, a qual ia sendo corrigida, à medida que se percebia a acomodação do material dentro da forma. Isso ocorreu até o ponto em que houve a estabilização da carga de 5 tf, quando então, o bloco foi mantido sob este carregamento durante 24 h.

Após a desmoldagem o bloco foi pesado e levado a estufa, a uma temperatura de 80 °C, durante 24 horas. O Bloco 3 pesou 266,62 gf, mediu 266 cm³, ficou com 67,5% m/m de fibras e com peso específico de 1,023 gf/cm³ (Figura 67 e Tabela 26).

Figura 67 - Aspecto do Bloco 3, após a retirada do molde.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Foram extraídos desse bloco, em serra circular de precisão, 3 corpos de prova de seção, aproximadamente quadrada, com 280 mm de comprimento (Figura 68 e Tabela 26).

Figura 68 – Corpos de prova de fibras transversais.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

d) Bloco 4

O Bloco 4 foi preparado com a utilização de 160 g de fibra de taquara-lixia. As fibras foram cortadas em guilhotina com 25 mm de comprimento e colocadas em estufa a temperatura de 100 °C, durante 24 horas para secagem. Depois disso,

foram acondicionadas em sacos plásticos duplos até que sua temperatura se igualasse a temperatura ambiente. As fibras foram divididas em três partes iguais para a acomodação no molde em três camadas (Figura 69).

Figura 69 – Colocação das fibras dispersas de 25 mm, no Bloco 4.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Os polímeros foram pesados em balança de precisão e misturados manualmente, por 3 minutos, imediatamente antes de sua aplicação. O líquido foi derramado sobre as fibras colocadas e acomodadas no molde com disposição aleatória sendo gradativamente socadas com pilão de aço e à medida que a quantidade aumentava, comprimidas com a tampa do molde e finalmente, levadas à prensa hidráulica para a compressão final de moldagem.

Após o fechamento do molde, a carga de compressão foi elevada até 5 tf e depois de sua equalização em 5 tf, foi mantida assim por um período de 24 horas.

Após a cura e o endurecimento do polímero o bloco foi desmoldado e pesado. O Bloco 4 pesou 502 gf, mediu 451,5 cm³, ficou com 31,9% m/m de fibras e com 1,11 gf/cm³ de peso específico (Figura 70 e Tabela 26).

Figura 70 – Aspecto do Bloco 4, após a moldagem.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Desse bloco, foram extraídos, com serra circular de precisão, 6 corpos de prova de seção, aproximadamente, quadrada, conforme mostra a Figura 71.

Figura 71 – Corpos de prova de fibras curtas, aleatórias.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

A Tabela 26 resume as características de todos os blocos acima descritos.

Tabela 26 – Características dos Blocos de Compósitos.

Bloco	Peso de fibras (gf)	Carga de moldagem (tf)	Fração volumétrica de fibras (%)	Peso específico (gf/cm ³)	Peso do bloco (gf)	Volume do bloco (cm ³)	Característica
1	270	5	56,6	1,099	477,00	434,00	Fibras longas 280 mm Longitudinais
2	290	7	63,3	1,027	458,00	446,18	Fibras longas 280 mm Longitudinais
3	180	5	67,5	1,002	266,62	266,00	Fibras curtas 47 mm Transversais
4	160	5	31,9	1,110	502,00	451,50	Fibras curtas 25 mm Dispersas

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

O peso específico aparente das fibras calculado após a moldagem dos blocos foi de 0,2555 gf/cm³ no Bloco 1; de 0,3892 gf/cm³ no Bloco 2; de 0,4726 gf/cm³ no Bloco 3 e de 1,2382 gf/cm³ no Bloco 4. Chama a atenção a menor fração volumétrica de fibras no Bloco 4 e em contraste o alto peso específico aparente da fibra. A explicação encontrada para isso seria o, relativamente, maior “engaiolamento” (posicionamento randômico criando espaços vazios) das fibras curtas do material vegetal durante a moldagem do bloco (Figura 69) o que inclusive teria levado a um maior volume do mesmo, com maior peso específico do compósito, já que a matriz de resina epóxi, mais densa, deve ter ocupado maior volume dentro do compósito. Excluindo-se este último valor da média o peso específico aparente médio das fibras seria igual a 0,3724 gf/cm³.

A Figura 72 apresenta o conjunto dos corpos de prova preparados para esta parte do trabalho, após sua extração a partir dos blocos moldados.

Figura 72 – Conjunto dos corpos de prova preparados.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

As dimensões de todos os corpos de prova após sua extração, dos blocos, foram tomadas pela média das medidas com paquímetro manual, segundo duas direções ortogonais (A e B) e em cinco posições, a saber: 9 mm; 46 mm; 140 mm; 188 mm e 262 mm. A Tabela 27 resume as dimensões de todos os corpos de prova extraídos dos blocos de compósitos acima descritos.

Tabela 27 – Dimensões dos Corpos de Prova extraídos de cada Bloco.

Dimensões Médias CP (mm)				Dimensões Médias CP (mm)		
CP	A	B		CP	A	B
BL1 CP1	11,50	11,06		BL3 CP13	13,00	12,59
BL1 CP2	11,20	10,87		BL3 CP14	13,16	12,99
BL1 CP3	11,47	11,00		BL3 CP15	13,06	12,45
BL1 CP4	13,82	13,33				
BL1 CP5	14,02	13,34		BL4 CP16	13,12	13,25
BL1 CP6	14,04	13,48		BL4 CP17	13,21	13,09
				BL4 CP18	13,06	13,29
BL2 CP7	13,04	13,16		BL4 CP19	13,08	13,24
BL2 CP8	13,02	13,04		BL4 CP20	13,08	13,45
BL2 CP9	13,10	12,99		BL4 CP21	13,13	13,37
BL2 CP10	12,92	13,20				
BL2 CP11	12,95	13,41				
BL2 CP12	12,93	13,44				

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

6.5 MÉTODO DE ENSAIO

6.5.1 Ensaio de Flexão de Três Pontos

Na segunda parte do procedimento experimental deste trabalho, foram executados Ensaaios de Flexão de Três Pontos em 21 corpos de prova, sendo seis (BL1 CP1 a BL1 CP6) de fibras longas alinhadas, moldados com carga de 5 tf e fração volumétrica de fibras de 56,6% (m/m); seis (BL2 CP7 a BL2 CP12) de fibras longas alinhadas, moldados com carga de 7 tf e fração volumétrica de fibras de 63,3% (m/m); três (BL3 CP13 a BL3 CP15) de fibras transversais, moldados com carga de 5 tf e fração volumétrica de fibras de 67,5% (m/m) e seis (BL4 CP16 a BL4 CP21) de fibras curtas e dispersas, moldados com carga de 5 tf e fração volumétrica de fibras de 31,9% (m/m). Esses ensaios foram efetuados em uma Prensa Universal EMIC DL10000, utilizando-se uma célula de carga de 200 kgf, a uma velocidade de ensaio de 1 mm/minuto. Utilizou-se um deflectômetro eletrônico acoplado ao sistema de aquisição de dados, medindo a deflexão do corpo de prova no ponto médio, entre apoios, do banzo inferior das amostras (Figura 73).

Figura 73 – Máquina Universal EMIC DL10000 e posicionamento do deflectômetro (LAME/LACTEC).



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Os ensaios dos corpos de prova extraídos dos Blocos 1, 2 e 4, foram feitos dentro do limite elástico do material, limitando-se as deflexões em 3 mm, para os

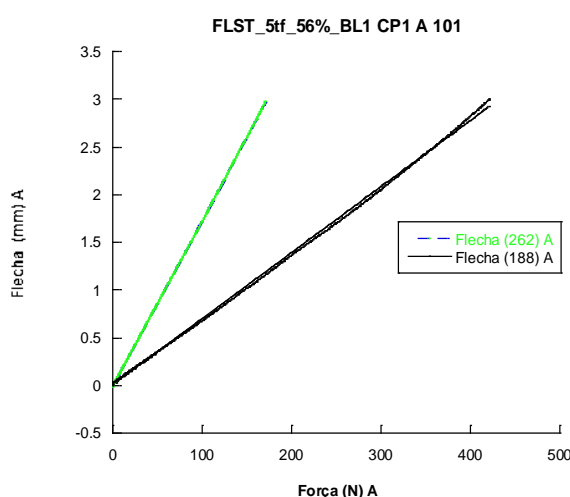
ensaios efetuados nas posições A e B, já que ambos os lados de sua seção reta eram de mesma ordem de grandeza. Para os corpos de prova extraídos do Bloco 3, as deflexões foram limitadas a 1,5 mm, nas duas posições de carregamento, ainda dentro dos limites elásticos do material, prevenindo-se assim o risco de rotura.

Convencionou-se aqui também, chamar de Posição A, a posição de ensaio do corpo de prova em que a direção da força de ensaio coincidia com a direção do carregamento de moldagem e de Posição B à posição de ensaio em que a direção da força de ensaio coincidia com a direção perpendicular do carregamento de moldagem.

Cada corpo de prova foi ensaiado segundo duas diferentes distâncias entre apoios (262 mm, 188 mm) e duas posições (direções) da seção reta, perpendiculares entre elas, sendo assim, efetuados 84 ensaios.

Os ensaios permitiram a elaboração de gráficos de Força vs. Flecha (deformação), os quais foram tratados, selecionando-se nesses gráficos os segmentos, aproximadamente, lineares em cada ensaio e fazendo-se correção de suas origens, conforme exemplo da Figura 74 que apresenta um gráfico construído para um Corpo de Prova (BL1 CP1) ensaiado, para duas diferentes distâncias entre apoios.

Figura 74 – Curvas obtidas do ensaio do BL1 CP1, Fibras Longas – Posição A.



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Com o auxílio do aplicativo computacional KaleidaGraph, Version 4.03, de Synergy Software (2006), foram efetuados os tratamentos de todos os dados

experimentais e os cálculos que se apresentam a seguir, em todas as etapas do trabalho.

Os gráficos, correspondentes a todos os corpos de prova ensaiados na segunda parte do procedimento experimental, estão disponíveis no Apêndice D desse trabalho.

6.5.2 Procedimento aplicado para obtenção dos valores dos Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento pelo método proposto – “Método Timoshenko”

O método de cálculo proposto nesse trabalho tem como base a Norma ASTM D 198 – 2013 que preconiza a execução do Ensaio de Flexão de Três Pontos de forma não destrutiva, em corpos de provas, segundo uma sequência de diversas distâncias entre apoios, sendo por isso chamado de “Método dos Vãos Variáveis”.

Inicialmente esta norma prescreve que deve existir uma relação mínima entre o Vão e a Altura da seção reta do corpo de prova, de modo que a mesma se enquadre na igualdade:

$$\frac{1}{12} \geq \frac{h}{L}$$

Além disso, determina que a distância entre os vãos ensaiados deve variar de modo que mantenham-se entre eles, incrementos de $\left(\frac{h}{L}\right)^2$, aproximadamente, iguais.

Dessa forma, considerando-se a limitação definida pela adoção do molde utilizado, com 280 mm de comprimento, feita em função da decisão do Grupo de Pesquisas de adotar, inicialmente, a Norma ASTM D 790 – 2010, foram refeitos agora, os cálculos destas distâncias, de modo que a Norma ASTM D 198 – 2013 fosse atendida.

O cálculo foi feito considerando-se as alturas básicas de 10 mm e 13 mm de corpos de prova a serem extraídos nessa parte do trabalho e que seriam as utilizadas com mais aproximação, em vista das dimensões dos blocos de compósitos

preparados. Dessa forma, equacionando-se o problema, chegou-se a uma sequência de seis vãos “*L*” que se combinados com as alturas “*h*”, escolhidas e aplicados à expressão acima, levavam a diferenças aproximadamente iguais a “zero” até a quarta casa decimal e, portanto, atendendo a citada prescrição normativa. Esses vãos seriam: 110 mm; 120 mm; 134 mm; 154 mm; 188 mm e 262 mm.

Considerando as conclusões apresentadas após a primeira parte deste trabalho, adotou-se então os dois maiores vãos desta sequência (262 mm e 188 mm) e com eles passou-se ao planejamento dos ensaios de flexão de três pontos e aos cálculos conforme a metodologia proposta.

6.5.3 Procedimentos de ensaio

Os ensaios foram executados em todos os 21 corpos de prova, segundo duas direções de carregamento (A e B), aplicando-se à Máquina Universal, a velocidade de 1 mm/minuto, com uma célula de carga de 200 kgf (respeitando a norma geral de ensaios, pela qual, a capacidade da célula de carga deve estar em torno de no máximo 10% do valor da carga final aplicada no ensaio).

Em todos os ensaios foi utilizado o já citado deflectômetro eletrônico cujo sensor em “*cantilever*” era posicionado no meio da face inferior dos corpos de prova.

Com os ensaios foram obtidas tabelas de dados relacionando tempo, flecha e força aplicada. Estas tabelas, obtidas em extensão “.txt”, seriam transcritas para outra tabela em programa “Microsoft WORD”, para depois serem copiadas e coladas nas planilhas do aplicativo “KaleidaGraph”, utilizado no trabalho.

Para cada corpo de prova eram obtidas quatro tabelas de dados correspondentes a cada um dos vãos ensaiado (2 vãos), em duas posições de carregamento ortogonais. Tinha-se, assim, por exemplo:

- BL1 CP1 A, vão 262 mm;
- BL1 CP1 B, vão 262 mm;
- BL1 CP1 A, vão 188 mm e
- BL1 CP1 B, vão 188 mm.

Com isso, foram efetuados 84 ensaios, para os quatro blocos de compósitos preparados.

Através do aplicativo “KaleidaGraph”, já citado anteriormente, foram construídos gráficos cartesianos “**F**” (força) vs. “**f**” (flecha), representando os ensaios para os dois vãos ensaiados em cada uma das posições (A ou B), de carregamento, conforme o exemplo da Figura 74, também apresentada anteriormente.

As curvas obtidas foram tratadas de forma a serem corrigidas suas origens para coeficientes lineares com valores inferiores a 0,02 e adotando-se ainda o trecho da curva que mais se aproximasse de uma reta, descartando-se as eventuais “anomalias”.

Assim conforme o procedimento proposto, os valores de **E** e **G**, para as posições A e B, de cada um dos corpos de prova foram obtidos pela interpolação da Equação de Timoshenko (Equação 43), (fundamentada na Teoria das Vigas de Timoshenko).

$$f = \frac{F L^3}{48 E I} + k \frac{F L}{4 A G} \quad (43)$$

Nessa equação, o fator de forma “**k**” é considerado variável, mas se mantém próximo de 0,80 (conforme pode ser observado, na segunda etapa da primeira parte deste trabalho). Nessa segunda parte do trabalho, foram adotados corpos de prova com seções, aproximadamente quadradas, isto é, seções em que $h \cong b$, procurando-se com isso eliminar-se a variável questionada na primeira parte do procedimento experimental.

Foram construídas tabelas de valores de **E** e **G**, para as duas posições (A e B) e para ambos os vãos adotados.

Calculou-se a média destes valores obtidos, conforme a metodologia proposta, obtendo-se então os valores médios de **E** e **G** para as duas posições, para cada bloco de compósito preparado.

As Tabelas 28, 29, 30 e 31 apresentam os valores de **E** e **G** calculados para cada um dos blocos preparados, assim como, também, os Erros Padrão das Estimativas e os Desvios Padrões, calculados pelo aplicativo já citado.

Tabela 28 - Médias dos valores dos módulos de elasticidade e de cisalhamento, considerando apenas os valores obtidos pela aplicação da Equação da Teoria das Vigas de Timoshenko, para os vãos 262 mm e 188 mm, consideradas as posições A e B. Bloco 1, Fibras Longas, 56,6 % (m/m) de fibras.

CP	E/A – TIMOSH. (MPa)	G/A – TIMOSH. (MPa)	E/B – TIMOSH. (MPa)	G/B – TIMOSH. (MPa)
BL1 CP1	16 596±471	905±3	16 866±623	905±3
BL1 CP2	18 723±883	904±2	18 745±335	904±3
BL1 CP3	15 181±234	901±12	14 167±762	893±1
BL1 CP4	16 836±491	895±5	14 556±598	898±6
BL1 CP5	13 939±809	899±4	14 576±101	902±3
BL1 CP6	15 867±47	900±1	14 787±537	905±0
MEDIA BL1 FL 56,6% (m/m)	16 115±444	901±2	15 616±526	901±2
Desvio Padrão	1 539	7	1 822	6

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Tabela 29 - Médias dos valores dos módulos de elasticidade e de cisalhamento, considerando apenas os valores obtidos pela aplicação da Equação da Teoria das Vigas de Timoshenko, para os vãos 262 mm e 188 mm, consideradas as posições A e B. Bloco 2, Fibras Longas, 63,4% (m/m) de fibras.

CP	E/A – TIMOSH. (MPa)	G/A – TIMOSH. (MPa)	E/B – TIMOSH. (MPa)	G/B – TIMOSH. (MPa)
BL2 CP7	18 667±241	900±1	18 363±149	891±2
BL2 CP8	18 215±200	899±3	18 593±271	898±1
BL2 CP9	16 567±526	900±3	16 679±348	897±1
BL2 CP10	15 517±274	926±29	16 054±437	889±8
BL2 CP11	15 541±409	904±6	16 685±278	904±2
BL2 CP12	14 048±730	884±4	14 222±155	885±7
MEDIA BL2 FL 63,4% (m/m)	16 409±505	902±5	16 766±450	894±2
Desvio Padrão	1 750	18	1 560	8

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Tabela 30 - Médias dos valores dos módulos de elasticidade e de cisalhamento, considerando apenas os valores obtidos pela aplicação da Equação da Teoria das Vigas de Timoshenko, para os vãos 262 mm e 188 mm, consideradas as posições A e B. Bloco 3, Fibras Transversais, 67,5% (m/m) de fibras.

CP	E/A – TIMOSH. (MPa)	G/A – TIMOSH. (MPa)	E/B – TIMOSH. (MPa)	G/B – TIMOSH. (MPa)
BL3 CP13	319±30	309±91	370±34	404±220
BL3 CP14	150±2	52±18	212±20	54±4
BL3 CP15	376±7	50±0	350±7	60±1
MEDIA BL3 FT 67,5 % (m/m)	281±44	137±59	311±33	173±93
Desvio Padrão	108	145	81	227

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Tabela 31 - Médias dos valores dos módulos de elasticidade e de cisalhamento, considerando apenas os valores obtidos pela aplicação da Equação da Teoria das Vigas de Timoshenko, para os vãos 262 mm e 188 mm, consideradas as posições A e B. Bloco 4, Fibras Curtas, 31,9% (m/m) de fibras.

CP	E/A – TIMOSH. (MPa)	G/A – TIMOSH. (MPa)	E/B – TIMOSH. (MPa)	G/B – TIMOSH. (MPa)
BL4 CP16	4 294±8	138±3	4 133±154	152±16
BL4 CP17	3 897±107	137±18	3 532±64	124±17
BL4 CP18	6 923±643	222±72	6918±20	166±1
BL4 CP19	6 587±390	151±1	6 251±267	143±16
BL4 CP20	5 219±143	119±20	5 051±146	103±19
BL4 CP21	7 108±14	700±25	6 943±4	253±52
MEDIA BL4 FC 31,9% (m/m)	5 672±387	244±63	5 471±403	157±17
Desvio Padrão	1 342	218	1 395,9	59

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

6.5.4 Avaliação estatística dos resultados

Analisaram-se os valores obtidos para todos os blocos, para todos os corpos de prova e para as duas posições (A ou B), de cada um deles pela Teoria das Pequenas Amostras (Método de Student), de modo a verificar-se a divergência de resultados obtidos entre uma e outra posição, com o objetivo de avaliar-se a existência de ortotropia nas amostras, já que com a adoção de amostras de seção quadrada buscava-se conferir a influência do Momento de Inércia da seção nos resultados.

6.5.4.1 Considerações a respeito da Teoria da Decisão Estatística

Esta teoria trata das decisões a serem tomadas à cerca de “populações selecionadas”, com base nas informações das amostras. Estas decisões são tomadas conforme “Hipóteses Estatísticas”.

Hipóteses estatísticas são conjecturas a respeito das “populações” que podem ou não ser verdadeiras e normalmente, consistem em considerações sobre as distribuições de probabilidades destas populações.

Assim, formula-se uma hipótese estatística (Hipótese Nula) com o único propósito de rejeitá-la ou invalidá-la. Dessa forma, se é preciso decidir, por exemplo, que um processo é melhor do que outro, formula-se a Hipótese Nula de que não há diferença entre eles (isto é, se houver diferenças, estas são, meramente, flutuações devidas ao próprio processo).

- Hipótese Alternativa é qualquer hipótese diferente da Hipótese Nula.
- Testes de hipótese ou de significância

Os processos que habilitam a decidir se aceitam-se ou rejeitam-se as hipóteses são denominados Testes de Hipótese, Testes de Significância ou Regras de Decisão.

- Tipos de Erros

Erro Tipo I: Ocorre quando uma hipótese é rejeitada quando deveria ser aceita.

Erro Tipo II: Ocorre quando uma hipótese é aceita quando deveria ter sido rejeitada.

Trata-se aqui, então, de Erro de Julgamento.

- Nível de Significância é a probabilidade máxima com a qual se aceitaria “correr o risco” de cometer um erro de julgamento do Tipo I.

É usual a adoção de Níveis de Significância 0,05 ou 5% e 0,01 ou 1%. Assim, se for escolhido um nível de significância de 5%, então quer dizer que há 5 chances em 100 de a hipótese ser rejeitada, quando deveria ser aceita. Em outras palavras, existe uma certeza de 95% de que seja tomada a decisão acertada.

Assim, diz-se que a hipótese é rejeitada no nível de significância de 0,05, querendo-se dizer que a probabilidade de erro é de 0,05 ou 5%. Então, o Escore “t” ou Estatística Amostral, dado, é significativo naquele nível.

6.5.4.2 Problemas de estatística a serem solucionados

Têm-se quatro tabelas de dados de corpos de prova ensaiados em duas posições (A e B) que fornecem as médias de ensaios em dois vãos (262 mm e 188 mm), por corpo de prova, para Módulos de Elasticidade “**E**” e de Cisalhamento “**G**”. Precisa-se decidir em Níveis de Significância 0,01 (1%) e 0,05 (5%), se as diferenças para os valores das posições A e B são significativas ou não. Caso sejam, fica definida a existência de ortotropia nas direções A e B, para os compósitos ensaiados e em caso contrário, fica demonstrada sua inexistência.

Assim, cada conjunto de dados A ou B, apresenta uma média \bar{X}_A ou \bar{X}_B , um desvio padrão \bar{S}_A ou \bar{S}_B e um número de amostras por população N_A ou N_B , com Grau de Liberdade correspondente a $(N_A + N_B - 2)$.

Podem então, ser estabelecidas as seguintes hipóteses:

- i) H_0 (Hipótese Nula): $\mu_A = \mu_B$ e não há diferença entre os conjuntos;
- ii) H_1 (Hipótese Alternativa): $\mu_A \neq \mu_B$ e há diferença significativa entre eles.

Segundo Spiegel, (1977), para o teste bilateral nos níveis de significância 0,01 e 0,05, H_0 será rejeitado, para o grau de liberdade $\nu = 22$, se “**t**” estiver fora dos intervalos $[-t_{0,995} \text{ a } t_{0,995}]$ que é de (- 2,82 a 2,82) ou $[-t_{0,975} \text{ a } t_{0,975}]$ que é (- 2,07 a 2,07), respectivamente, (Tabela no Anexo B).

As Equações 44 e 45 permitem calcular o valor de “ t ”:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(N_A \cdot A_s^2) \cdot (N_B \cdot B_s^2)}{N_A + N_B - 2}} \quad (44)$$

$$t = \frac{X_A - X_B}{\sigma \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_B}\right)}} \quad (45)$$

onde:

t – escore ou estatística;

σ – desvio padrão da população

N_A e N_B – número de amostras de cada conjunto;

X_A e X_B – média amostral;

A_s e B_s - desvio padrão de cada conjunto.

A Tabela 32 apresenta os valores de “ t ”, calculados conforme as Equações 44 e 45, para os quatro blocos de compósitos ensaiados:

Tabela 32 – Cálculo dos valores de “ t ”, Posição A vs. Posição B.

BLOCO CP/DIREÇÃO	N_A	N_B	X_A (MPa)	X_B (MPa)	A_s (MPa)	B_s (MPa)	σ	t
BL1 CP1-6 E/A-B	12	12	16 115	15 616	1 539	1 823	1 761,44	0,69
BL1 CP1-6 G/A-B	12	12	901	901	7	6	6,81	0,00
BL2 CP7-12 E/A-B	12	12	16 409	16 766	1 750	1 560	1 731,44	-0,51
BL2 CP7-12 G/A-B	12	12	902	894	18	8	14,55	1,35
BL3 CP13-15 E/A-B	6	6	281	311	107	81	103,95	-0,50
BL3 CP13-15 G/A-B	6	6	137	173	145	227	208,53	-0,30
BL4 CP16-21 E/A-B	12	12	5 672	5 471	1 342	1 396	1 430,15	0,34
BL4 CP16-21 G/A-B	12	12	244	157	218	58	166,60	1,28

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Assim, nessa análise, com base nos testes de significância avaliados, em nenhum dos casos a hipótese H_0 pode ser rejeitada, querendo dizer que não existe chance razoável de as diferenças entre as amostras serem significativas. Logo,

sendo as amostras, estatisticamente, semelhantes fica descartada a existência de ortotropia, consideradas as direções A e B de carregamento de moldagem.

Por outro lado, em uma segunda análise, comparando-se os resultados obtidos para os Blocos 1 e 2, verifica-se que, aparentemente, os mesmos não apresentaram diferenças sensíveis, considerando-se que o Bloco 1 é um compósito moldado com carga de 5 tf, contendo 270 gf de fibras longas e alcançou 56,6% de fração volumétrica de fibras e que o Bloco 2 foi moldado com carga de 7 tf, 290 gf de fibras e alcançou 63,3% de fração volumétrica. Esta constatação pode indicar que as amostras não são essencialmente diferentes, pela forma de moldagem.

Fazendo-se semelhante análise estatística e estabelecendo novas hipóteses, para a situação:

iii) H_0 (Hipótese Nula): $\mu_A = \mu_B$ e não há diferença significativa entre os resultados dos dois conjuntos;

iv) H_1 (Hipótese Alternativa): $\mu_A \neq \mu_B$ e há diferença significativa entre eles.

A Tabela 33 apresenta o resumo dos cálculos feitos para esta nova situação.

Tabela 33 – Comparação estatística entre o Bloco 1 e o Bloco 2.

BLOCO CP/DIREÇÃO	N _A	N _B	X _A (MPa)	X _B (MPa)	A _s (MPa)	B _s (MPa)	σ	t
BL1/2 1-6/7-12 E/A	12	12	16 115	16 409	1 539	1 750	1 721,16	-0,42
BL1/2 1-6/7-12 G/A	12	12	901	902	7	18	14,26	-0,17
BL1/2 1-6/7-12 E/B	12	12	15 604	16 796	1 809	1 560	1 764,20	-1,66
BL1/2 1-6/7-12 G/B	12	12	901	894	6	8	7,39	2,32

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Nesse caso, considerando os mesmos níveis de significância anteriormente utilizados, pode-se concluir:

- Não há diferença significativa entre os resultados de E/A e G/A considerando os Blocos 1 e 2, pois para 22 graus de liberdade as estatísticas $t = -0,42$ e $t = -0,17$ encontram-se dentro dos intervalos de significância tabelados;
- No caso de E/B e G/B, deve-se rejeitar a hipótese H_0 , para G/B, no nível de significância 0,05 ou 5%, já que o valor de $t = 2,32$ extrapola o intervalo de significância tabelado e mesmo para E/B, o valor de $t = -1,66$ apresenta-se relativamente alto justificando uma melhor análise posterior, antes de aceitá-la.

6.5.5 Resultados e discussão da Segunda Parte Experimental

A Tabela 34 resume os resultados de Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento obtidos na Segunda Parte do procedimento experimental deste trabalho e compara-os com os resultados das duas primeiras etapas da Primeira Parte, designando-os aqui como ASTM 1 e TIMSH 2.

Tabela 34 – Resumo dos resultados de Módulos de Elasticidade e de cisalhamento obtidos no trabalho.

REF.	CARG (tf)	%	COMP. (mm)	DISTR.	E/A (MPa)	G/A (MPa)	E/B (MPa)	G/B (MPa)
ASTM 1	5	56	LONGA 280	LONGIT.	15 516±654	1 169±193	17 680±866	810±52
ASTM 1	5	54	CURTA 25	DISPERS.	7 463±84	597±155	7 698±380	1 680±514
TIMSH 2	5	56	LONGA 280	LONGIT.	15 476±365	932±19	15 940±399	1 058±32
TIMSH 2	5	54	CURTA 25	DISPERS.	6 838±153	1 042±137	7 399±192	701±19
BL1	5	56,6	LONGA 280	LONGIT.	16 115±444	901±2	15 616±526	901±2
BL2	7	63,3	LONGA 280	LONGIT.	16 409±505	902±5	16 766±450	894±2
BL3	5	67,5	CURTA 47	TRANSV.	281±44	137±59	311±33	173±93
BL4	5	31,5	CURTA 25	DISPERS.	5 672±387	244±63	5 471±403	157±17

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2014.

Legenda: Longit.: fibras longas longitudinais; Dispers.: fibras curtas dispersas; Transv.: fibras 47 mm, transversais.

A Tabela 34 permite constatar que os resultados de Módulos de Elasticidade obtidos pela aplicação do método proposto nesse trabalho apresentam clara coerência, entre si, isto é, considerando os compósitos de fibras longas (280mm), é possível perceber que eles variam entre 15 500 MPa (Timoshenko, 1ª Parte, Etapa 2) e 16 400 MPa (Bloco 2), crescendo com o aumento da fração volumétrica de fibras.

No caso dos compósitos de fibras curtas (25mm), é possível observar coerência entre os resultados que variam entre 5 700 MPa (Bloco 4) até 6 800 MPa (Timoshenko, 1ª Parte, Etapa 2), também crescendo com a fração volumétrica de fibras.

Observa-se que os resultados obtidos pelo Método ASTM, na primeira etapa da 1ª Parte, apresentam uma dispersão relativamente maior, como já foi descrito anteriormente.

Os resultados obtidos para Módulo de Cisalhamento, nessa segunda parte do trabalho, convergem para o valor 900 MPa, sendo um pouco maiores, no caso de maior fração volumétrica. Se comparados os resultados obtidos para os Blocos 1 e 2, com os obtidos para Timoshenko, Segunda Etapa, houve pequena redução, sendo que continua-se a notar que os resultados são próximos dos obtidos para a matriz de resina epóxi (que deve ser igual a 1 287 MPa, conforme Giurgiutiu (1995), mas que assim podem ser esperados já que a resistência ao cisalhamento deve ser menor no contato fibra-matriz, do que no interior de uma peça maciça de epóxi (matriz-matriz).

A análise estatística feita sobre os resultados da segunda parte experimental demonstrou não haver diferenças significativas entre as médias dos valores obtidos para as duas posições A e B, tanto no caso dos Módulos de Elasticidade como no dos Módulos de Cisalhamento.

Assim sendo, a obtenção dos resultados, com base nestes resultados, poderia ser feita de duas maneiras:

- a) Considerando-se todos os resultados indistintamente obtidos para as posições A e B, para as duas distâncias entre apoios ensaiadas à flexão, num total de 24 ensaios, por bloco de compósito, considerando assim todos como pertencentes a um mesmo conjunto homogêneo de dados e adotando sua média como o valor procurado;
- b) Adotando-se como valor procurado a média dos ensaios de flexão (12), efetuados apenas para as duas distâncias entre apoios definidas, segundo a direção A.

Em coerência com a proposta original do trabalho, qual seja, a definição de um método confiável e mais expedito para a determinação de propriedades mecânicas de compósitos, preferiu-se a segunda alternativa, porquanto os resultados entre as duas não difere estatisticamente, no nível de significância 1% ou 0,01 e evidentemente, tornam o procedimento menos demorado e oneroso. Sendo assim, dessa forma, foram calculados os resultados apresentados, devendo ser

estes os resultados de Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento considerados como os mais realistas obtidos.

6.5.6 Conclusões relativas à Segunda Parte do procedimento experimental

Havia dúvida, após a primeira parte do procedimento experimental, quanto à real existência da característica de ortotropia do compósito de fibra longa de taquara-lixá, porquanto os corpos de prova ensaiados, anteriormente, tinham sido extraídos do molde com seções retas retangulares, o que poderia gerar a influência do Momento de Inércia no cálculo das características mecânicas já que entre seções retangulares de mesma área, a que tivesse maior altura apresentaria maior momento de inércia podendo influir no resultado.

Por outro lado, a direção de aplicação da carga de moldagem poderia causar algum efeito, já que poderia haver acomodação e esmagamento das fibras nessa direção, o que poderia afetar os módulos de cisalhamento e de elasticidade.

Para elucidar esta questão, foram moldados novos blocos de compósitos, com diversas frações volumétricas de fibras, sendo para isso utilizada uma quantidade remanescente de fibras de taquara-lixá, preparadas conforme o processo desenvolvido pelo grupo de pesquisa de Joinville.

Conforme já descrito, prepararam-se quatro blocos de compósitos de matriz de resina epóxi reforçados com fibras de taquara-lixá, com diferentes teores de fibra de diferentes cargas de moldagem.

Conforme relatado na revisão bibliográfica, diversos autores reportaram haver variação das propriedades mecânicas dos compósitos com a variação da fração volumétrica e do comprimento das fibras e da distribuição das fibras no corpo de prova.

Assim, aqueles autores relatam o aumento dos módulos de elasticidade e tensão de flexão e de compressão, com o aumento da fração volumétrica de fibras.

Alves (2012) e Reis (2013) relatam a variação nas propriedades conforme a orientação das fibras nos compósitos o que conferiria características de anisotropia ou ortotropia aos materiais. Osório *et al.*, (2007) também se referem ao mesmo fenômeno.

Nessa segunda parte do trabalho, foram moldados dois blocos de compósitos (Bloco 1 e Bloco 2) com matriz de resina epóxi de procedência diferente daquela utilizada, anteriormente, na primeira parte do trabalho. Em ambos os blocos, foram aplicadas fibras longas de taquara-lixo como reforço da matriz de resina epóxi e conforme a metodologia de preparo já descrita aplicou-se carga de moldagem através de uma placa móvel, perpendicularmente à face de maior área do bloco, sendo que um dos blocos teve carga de 5 tf com 270 gf de fibra, atingindo 56,6% (m/m) de fração volumétrica (Bloco1). O Bloco 2 foi moldado com carga de 7 tf, 290 gf de fibras e a fração volumétrica atingiu 63,5% (m/m).

Aplicando-se o método de cálculo proposto para determinação de propriedades mecânicas de compósitos, foram calculados os Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento dos corpos de prova (6 peças por bloco), extraídos desses blocos.

Nessa segunda parte experimental, os corpos de prova foram cortados com seções, aproximadamente, quadradas, isto é, as duas dimensões das seções seriam aproximadamente, iguais, com o intuito de avaliar-se a influência do momento de inércia da seção reta, nos resultados dos cálculos.

A Tabela 33 resume os resultados médios obtidos pela aplicação do método proposto, com aplicação de Ensaio de Flexão de Três Pontos, em todos os corpos de prova dos Blocos 1 e 2.

A análise estatística destes resultados mostrou não haver diferenças significativas entre as médias dos resultados dos ensaios efetuados nas direções A e B, o que nos leva a concluir que não existe diferença nos resultados dos ensaios aplicados nessas duas direções. Conclui-se daí, que é suficiente que sejam ensaiados seis corpos de prova, segundo apenas dois vãos conforme se propõe (262 mm e 188 mm), no caso em que seja adotado o molde de 280 mm e que a média dos resultados é estatisticamente, representativa das propriedades procuradas.

Isto leva a um dos objetivos do trabalho que seria a simplificação dos procedimentos para determinação de propriedades mecânicas de compósitos.

Além disso, uma segunda análise estatística efetuada, levou a concluir que ao menos no caso de cálculo de Módulos de Elasticidade, não se chegou a diferenças significativas entre os resultados obtidos para os dois blocos, se forem comparados

entre si, parecendo significar que a diferença de 2 tf (5 tf para 7 tf) assim como o consequente aumento da fração volumétrica obtido, não representou aumento significativo das propriedades mecânicas.

No entanto, esta mesma análise estatística mostrou, no caso do Módulo de Cisalhamento que ao menos no Nível de Significância 5% esta diferença é significativa o que indicaria a necessidade de maior número de ensaios para que se pudesse chegar a um resultado mais conclusivo.

A simples observação dos resultados indica uma tendência de melhoria das propriedades, com o aumento da carga de moldagem e consequentemente, da fração volumétrica de fibras presente no compósito. Seria de grande interesse pesquisar-se até que ponto esse acréscimo de carga e de fibras seria conveniente e justificável, técnica e economicamente.

O terceiro bloco foi moldado com 190 g de fibras e com 5 tf de carga de moldagem. Isto resultou em 67,5% de fração volumétrica de fibras. Diferente de todos os outros blocos já preparados, este bloco teve suas fibras distribuídas cuidadosamente em direção transversal ao comprimento do molde, permitindo o ensaio de flexão na direção perpendicular às fibras. Nesse caso, a ação adesiva da matriz entre as fibras, limitou-se à largura de 50 mm do molde e no caso do corpo de prova, ao comprimento dos lados da seção reta do mesmo, isto é, a “*h*”.

Foram extraídos deste Bloco 3, três corpos de prova de fibras transversais. O módulo de elasticidade obtido foi da ordem de 50 vezes menor do que aqueles obtidos para corpos de prova de fibras longas longitudinais e 20 vezes menor do que aqueles obtidos para blocos de fibras curtas dispersas. O módulo de cisalhamento foi da ordem de 6 vezes menor do que o obtido, correntemente, para compósitos de fibras longas e duas vezes menor, se comparados aos compósitos de fibras curtas (ou no mínimo, de mesma ordem de grandeza se analisarmos os resultados obtidos segundo a direção B). De forma ainda inédita, pode-se avaliar e constatar que para fibras curtas (± 10 a 12 mm) os Módulos de Elasticidade são de mesma ordem de grandeza nas duas direções perpendiculares e o Módulo de Cisalhamento parece variar 50% se a carga de ensaio for aplicada “de topo” ou perpendicularmente, às fibras.

É preciso relatar, entretanto que foi constatada uma anomalia nas curvas Força vs. Deslocamento (Flecha), construídas com os resultados destes ensaios,

(Figuras A.41 a A.43, no Apêndice D). Deve-se recordar que para estes ensaios limitou-se a deformação em 15 mm e que talvez a célula de carga (200 kg) utilizada tenha sido muito resistente (pouco sensível), para as cargas finais alcançadas e que isso pode ter sido determinante nos resultados obtidos. Também foi pequeno (três) o número de CP, obtidos para esse importante ensaio. Assim sendo, apesar dos interessantes resultados obtidos, deve-se considerar com reservas as conclusões que deles podem ser tiradas.

Estas constatações justificam a recomendação de que se façam pesquisas mais extensas acerca deste detalhe.

É interessante ressaltar que diferentemente do que parecia ocorrer, deve-se concluir que não existe a característica da ortotropia dos compósitos, nas direções perpendiculares da seção reta do corpo de prova. Isto é, deve-se admitir a existência de isotropia planar, segundo as direções A e B. Isto, entretanto, demonstra o efeito de reforço proporcionado pelas fibras longas longitudinais.

No sentido transversal, o efeito é cerca de 50 vezes menor para o módulo de elasticidade e é 6 vezes menor para o Módulo de Cisalhamento.

É interessante notar que o Módulo de Cisalhamento do compósito é cerca de 30% menor que o módulo de cisalhamento da matriz de resina epóxi, podendo estar a demonstrar deficiência na adesividade entre fibra e matriz. Isto pode ser consequência da utilização da fibra não tratada, neste experimento.

Confirma-se, também, a constatação de outros autores (ALVES, 2012; REIS, 2013) com respeito à melhora das propriedades mecânicas dos compósitos com aumento da fração volumétrica de fibras.

6.6. ESTUDO COMPARATIVO DE CUSTOS DE MATERIAIS

Entendendo ser de interesse fazer-se um estudo comparativo de custos de materiais para com isto, avaliar-se a viabilidade econômica dos compósitos aqui desenvolvidos, frente aos custos dos materiais diante dos quais os mesmos se colocam como alternativa apresenta-se o que segue:

Em princípio, esta pesquisa dispunha-se a analisar um material alternativo para o uso de dormentes ferroviários. O material mais utilizado até o momento para a fabricação de dormentes no Brasil é a madeira. A madeira mais utilizada em função de seu custo e facilidade de obtenção é o eucalipto originado de reflorestamentos, plantados já há muitos anos, especificamente, para este fim. De acordo com o que foi visto na revisão bibliográfica e tomando sempre como base o ano de 2014, o dormente deste material pode custar, entre R\$60,00 e R\$80,00 por unidade. (O dormente para bitola métrica, a mais comum no Brasil mede, em média, 2 000 cm x 22 cm x 18 cm, ou $7,92 \times 10^5 \text{ cm}^3$).

O polímero epóxi custa R\$33,00 por quilograma, e o endurecedor custa R\$86,60 por quilograma.

De acordo com preços correntes de mercado o bambu, "*in natura*", pode ser comprado a R\$5,00 por quilograma.

Assim, ao preço de R\$80,00 (para ser considerado um acréscimo inflacionário), o custo do dormente de eucalipto, seria de $\text{R\$}1,0 \times 10^{-4}$ por cm^3 .

O bloco moldado para corpo de prova de fibras longas, com 56,6% (m/m) de fibras, mediu 420 cm^3 , pesando 477 gf. Continha então, arredondando, 57% de fibras e 43% de resina epóxi ou, respectivamente, 270 g de fibras e 207 g de resina.

A resina misturada ao endurecedor a 13% custa então, pelos preços acima, R\$0,039 por grama.

De acordo com Reis (2013), o rendimento de fibras de taquara-lixas tratadas é de 86% (m/m) custando então a fibra preparada, R\$5,81 por quilograma, ou R\$0,00581 por grama.

Assim, um bloco de compósito de resina epóxi reforçado com fibras longas de taquara-lixas pesando 477 gf e com 420 cm^3 , custa:

- resina: $207,0 \text{ g} \times \text{R\$}0,039/\text{g} = \text{R\$}8,073$;
- fibras: $270,0 \text{ g} \times \text{R\$}0,00581/\text{g} = \text{R\$}1,569$;

- Custo Total: **R\$9,64 por bloco de 420 cm³**.

Desta forma, um dormente para bitola métrica, feito com esse compósito custaria a esses preços ($\text{R\$}9,64/420 \text{ cm}^3 \times 7,92 \times 10^5 \text{ cm}^3$) = R\$18.178,29 por peça.

Considerando que o custo de um bloco de 420 cm³ feito de eucalipto a R\$1,0 x 10⁻⁴/cm³ seria de **R\$0,042 por bloco de 420 cm³**, então se conclui que o dormente de eucalipto custaria, aproximadamente, 230 vezes menos que o de compósito de resina epóxi reforçado com fibra de taquara-lixo, não sendo considerado aqui, ainda, o custo de mão de obra e outros investimentos industriais.

Se for considerado que um dormente de eucalipto, sem tratamento com preservativos químicos, pode durar em uso normal, na via, por 12 a 15 anos e um dormente de plástico pode ser usado na via férrea por até 50 anos, para que fosse alternativa econômica viável, este último deveria custar no máximo até 5 vezes mais (em torno de R\$450,00), o que pelo demonstrado não é o caso.

Assim, mesmo sendo o compósito estudado, bastante interessante, como material de engenharia, por suas propriedades físicas e mecânicas, em muitos aspectos superiores às da madeira, o mesmo não se apresentaria como alternativa para uso ferroviário, como dormente, podendo, entretanto, ter sua aplicação estudada em utilidades por assim dizer, mais nobres.

Para uso ferroviário, devem ser pesquisadas e nesse aspecto o método de cálculo de características mecânicas, aqui proposto, pode ser de grande utilidade, outras composições poliméricas reforçadas com fibras vegetais, talvez com matrizes de materiais plásticos reciclados (PP, PE, PPMA, etc.) que possam alcançar custo final competitivo frente à madeira de eucalipto de reflorestamento.

7 COMENTÁRIOS E CONCLUSÃO FINAL

No presente trabalho, passou-se a utilizar as fibras de taquara-lixo, sem tratamento químico, o que é inédito na literatura, mesmo prevendo-se uma menor compatibilidade destas com a matriz polimérica.

As fibras de taquara-lixo foram caracterizadas por imagens de microscopia óptica e através de análise térmica, espectroscopia na região do infravermelho e índice de cristalinidade, dados também inéditos na literatura. Concluiu-se que as fibras de taquara-lixo apresentam um teor de umidade de 7,1%, mantém sua estabilidade térmica até 250 °C e que seu índice de cristalinidade é de 59%, semelhante ao de fibras como as da *Luffa cilíndrica* – bucha vegetal e de pita e menor que os das fibras de agave azul, curauá e sisal.

Foram obtidos, assim, os valores médios de E_v e G , para cada corpo de prova, 4 (quatro) de fibras longas e 3 (três) de fibras curtas e finalmente, as médias destes valores, obtendo-se E e G em duas posições ortogonais (E/A, G/A, E/B e G/B) que sendo diferentes, pareciam indicar ortotropia do material analisado.

Estes valores obtidos mostraram que as propriedades mecânicas para corpos de prova na posição B (carga de ensaio perpendicular à direção do carregamento de moldagem) eram maiores que as da posição A (carga de ensaio paralela à direção de carregamento de moldagem) sugerindo que a acomodação das fibras, forçada pela compressão de moldagem teria influência ortotrópica nas propriedades mecânicas do compósito.

Foi moldado um corpo de prova em forma de viga-sanduiche, utilizando-se o compósito de fibras longas não tratadas nas faces e o de fibras curtas não tratadas no núcleo. Este corpo de prova foi ensaiado em teste de flexão de três pontos, com vão de 265 mm, dentro dos limites de elasticidade e determinadas suas deformações. Foi, também, executada uma simulação pelo método dos elementos finitos, utilizando-se como dados de entrada os resultados das propriedades mecânicas obtidos para os compósitos de fibras longas e curtas, nas posições de ensaio A e B, obtidas por este método e ainda o Módulo de Poisson igual a 0,3 indicado pela literatura.

A comparação dos resultados experimentais de deformação com os obtidos na simulação mostrou diferenças percentuais em torno de 4%, indicando serem os valores das propriedades mecânicas aplicadas, ainda relativamente, defasados daqueles que se poderiam esperar como sendo verdadeiros.

Em vista disso, foi feito um segundo estudo, para o cálculo das propriedades mecânicas e desta vez aplicando-se a equação da Teoria das Vigas, de Timoshenko.

Foi feita a interpolação desta equação, diretamente sobre as curvas Força vs. Flecha, obtidas nos ensaios de flexão dos corpos de prova de todos os compósitos do estudo anterior, permitindo-se nessa interpolação, a variação do valor do fator k , chamado de fator de forma.

Com os valores obtidos, foram feitas simulações pelo método dos elementos finitos, de todos os ensaios de flexão de todos os corpos de prova, para os cinco vãos e para as posições A e B de ensaio.

Comparando-se as deformações dos experimentos com os resultados das simulações, constatou-se que eram significativamente menores as diferenças encontradas para os vãos maiores, isto é, para aqueles que se enquadrariam na razão $L \geq 12h$, sugerida pela norma ASTM D198-2013 (vãos de 238 mm e 265 mm), indicando serem as propriedades mecânicas obtidas com esses vãos, aquelas, mais próximas dos valores esperados como verdadeiros.

Foram calculadas, então, médias dos valores destes dois vãos de todos os ensaios e também, finalmente, a média dos valores assim obtidos, para os corpos de prova de fibras longas (4) e de fibras curtas (3), nas posições A e B.

Fazendo-se nova simulação do corpo de prova em forma de viga-sanduíche, aplicando-se agora estes últimos valores de propriedades mecânicas e comparando-se as deformações obtidas com as experimentais, as diferenças percentuais caíram para valores menores do que 1%, e foram aproximadamente três vezes menores do que aquelas obtidas com os valores fornecidos pelo método da ASTM D198-2013.

Recordando que o conceito de Módulo de Elasticidade Global não pode ser aplicado para um material não homogêneo já que E é variável na direção da flexão e que por isso a única característica mecânica que prevalece no caso da viga-sanduíche é a Rigidez Flexional, foi determinada a rigidez flexional para o citado corpo de prova simulado em duas situações distintas. A primeira aplicando-se os

valores das propriedades mecânicas calculadas pelo método da ASTM D198 - 2013 e a segunda pelo chamado Método de Timoshenko. Os resultados obtidos para o valor de Rigidez Flexional **D**, para as duas hipóteses divergiram em torno de 1%.

Foi construído um gráfico cartesiano coordenando-se os valores de **D**, para as duas hipóteses, contra valores variáveis da espessura da face de uma viga sanduíche e foi possível visualizar de forma inédita que a curva dos valores obtidos pelo Método de Timoshenko e sua faixa de erros padrão da estimativa (erros “*standard*”) encontravam-se incluídas na faixa dos erros “*standard*”, dos valores de **D** calculados pelo Método da ASTM D198-2013, indicando serem os valores das propriedades mecânicas calculados pelo Método Timoshenko, mais acurados do que aqueles calculados pelo outro método.

Foi, assim, possível concluir que o método aqui proposto, de forma também ainda inédita, seria a forma mais acurada de cálculo simultâneo dos valores dos Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento de compósitos poliméricos.

Os valores obtidos desta forma, na primeira parte deste trabalho, para os compósitos de matriz de resina epóxi reforçados com fibras vegetais longas e curtas de taquara-lixá, nas duas posições ortogonais em relação a direção de compressão na moldagem foram, respectivamente:

a) Fibras longas de 280 mm, 56% (m/m):

CP	E/A – TIMOSH. (MPa)	G/A – TIMOSH. (MPa)	E/B – TIMOSH. (MPa)	G/B – TIMOSH. (MPa)
MEDIA FL	15 463	932	15 940	1 058

b) Fibras curtas de 25 mm, 54% (m/m):

CP	E/A – TIMOSH. (MPa)	G/A – TIMOSH. (MPa)	E/B – TIMOSH. (MPa)	G/B – TIMOSH. (MPa)
MEDIA FC	6 838	1 042	7 399	1 033

Comparados estes valores com os obtidos por Reis (2013), foram encontradas diferenças para menor, de 24% para fibras longas e de 16% para fibras curtas, diferenças estas devidas, provavelmente, a melhor compatibilidade mecânica fibra/matriz, proporcionada pelo tratamento alcalino das fibras.

Já, a segunda parte do procedimento experimental levado a efeito, permitiu concluir que mesmo utilizando-se uma matriz de resina epóxi de outra procedência,

os resultados obtidos não apresentaram diferenças essenciais, mostrando assim que o procedimento de cálculo proposto é confiável.

Assim:

- a) Para compósito de fibras longas alinhadas (280 mm), moldado com carga de 5 tf e fração volumétrica de 56,6 % (m/m) de fibras foram obtidos:

CP	E/A (MPa)	G/ (MPa)	E/B (MPa)	G/B (MPa)
MEDIA FL	16 115	901	15 616	901

- b) Para compósito de fibras longas alinhadas (280 mm), moldado com 7 tf de carga e fração volumétrica de 63,3 % (m/m) de fibras:

CP	E/A (MPa)	G/A (MPa)	E/ (MPa)	G/B (MPa)
MEDIA FL	16 409	902	16 766	894

- c) Para compósito de fibras curtas transversais (47 mm), moldado com carga de 5 tf, e fração volumétrica de 67,5% (m/m) de fibras:

CP	E/A (MPa)	G/A (MPa)	E/B (MPa)	G/B (MPa)
MEDIA FT	281	137	311	173

E, finalmente:

- d) Para compósito de fibras curtas dispersas (25 mm), moldado com carga de 5 tf e fração volumétrica de 31,5% (m/m) de fibras:

CP	E/A (MPa)	G/A (MPa)	E/B (MPa)	G/ (MPa)
MEDIA FC	5 672	244	5 471	157

A menos dos valores obtidos para o Bloco 3, quando se ensaiou de forma ainda inédita, um compósito de fibras alinhadas transversalmente, todos os valores obtidos encontram-se nas faixas de valores de módulos de elasticidade obtidos por outros autores (Tabela 34, p.165 e Tabela 13, p.109).

O caso do Bloco 3 parece mostrar de forma clara que as propriedades mecânicas dos compósitos são extremamente dependentes da continuidade das fibras e que essa forma de distribuição não confere o efeito de reforço ao material compósito e a resistência ao cisalhamento na interface fibra matriz tende ao seu valor mínimo.

De acordo com Pfeil e Pfeil (2003), no caso de madeiras, de modo geral, considera-se que:

$$G = 7\% E.$$

Considerando-se as médias dos valores obtidos na primeira parte desse trabalho, são encontradas as relações:

a) Fibras longas de 280 mm: $G_{fl} = 6,4\% E_{fl}$;

b) Fibras curtas de 25 mm: $G_{fc} = 14,6\% E_{fc}$.

Na segunda parte, estas relações reduzem-se, encontrando-se em média:

a) Fibras longas de 280 mm: $G_{fl} = 5,6\% E_{fl}$;

b) Fibras curtas de 25 mm: $G_{fc} = 4,3\% E_{fc}$.

Parece razoável esperar que a relação percentual entre Módulo de Cisalhamento e de Elasticidade de materiais compósitos de matriz de resina epóxi reforçada por fibras vegetais seja parecida com aquela que se aceita para o caso das madeiras ($G = 7\% E$) e também que seja maior para o caso das fibras curtas em comparação com as longas, porquanto para aquelas deve ser menor o efeito de reforço criado pela ação da resistência ao cisalhamento das fibras longas (Folkes, 1985). Esse efeito não parece ter sido obtido com tanta evidência na comparação feita com os resultados da segunda parte experimental do trabalho, significando que nos experimentos da segunda parte do trabalho constatou-se maior influência do componente devido às tensões cisalhantes, nos valores de flecha observados.

Pode-se perceber também, que para os compósitos de fibras longas, o módulo de cisalhamento parece tender para o valor do módulo de cisalhamento da matriz de resina epóxi que está em torno de 1 287 MPa (GIURGIUTIU, 1995).

Tomando-se como referência o que preconizava a norma ABNT NBR 7190:1997 em seu item 4.1.4 (Tabela 1) e nas Tabelas de Valores Médios de Madeiras Dicotiledôneas e Coníferas Nativas e de Reflorestamento apresentadas no Anexo A, é possível perceber que os valores de módulos de elasticidade obtidos para os compósitos estudados neste trabalho ou superam ou são equivalentes aos das madeiras mais utilizadas, atualmente, para a fabricação de dormentes ferroviários (eucalipto de espécies diversas) o que poderia indicar um grande potencial para sua utilização nessa arte de engenharia. Assim, apesar de os compósitos taquara-lixo não tratada/resina epóxi apresentarem menor resistência do que os compósitos preparados com fibras tratadas com NaOH é possível dizer que

os mesmos alcançaram a resistência suficiente para emprego nas vias férreas, em que pese seus custos tornarem sua aplicação inviável. Na realidade, o estudo expedito de custos elaborado neste trabalho demonstrou não ser o compósito aqui abordado, economicamente, viável para ser empregado como alternativa ao uso de madeira de eucalipto, para fabricação de dormentes ferroviários.

Entretanto, em outras aplicações, a estrutura do tipo viga-sanduiche preparada com fibras sem tratamento químico, também se mostra promissora, merecendo a atenção em estudos comparativos mais aprofundados, com outros sistemas estruturais de uso corrente.

Verificou-se que em ensaios de absorção de água os compósitos aqui apresentados atingem até 8,4% de absorção, em ensaios padronizados de 24 horas, o que é um valor até três vezes menor do que pode absorver a madeira (20% a 30%).

Para comparação com a madeira natural, outros ensaios poderiam ser feitos ainda com o compósito estudado, conforme prescreve a norma ABNT NBR 7511:2013 - Dormentes de madeira - Requisitos e métodos de ensaios.

Assim, poderiam ser indicados ensaios de compressão normal às fibras, resistência ao arrancamento normal de parafusos (tirefão), rigidez do compósito ao deslocamento lateral do parafuso (tirefão) e dureza Janka do compósito. Além desses ensaios, os compósitos poderiam ser submetidos a ensaios de envelhecimento, de resistência ao ataque de produtos químicos e àqueles que permitissem estudar a influência da fração volumétrica nas propriedades mecânicas e a tração das fibras de taquara-lixo não tratada e o comprimento crítico de arrancamento da fibra, em relação à matriz de resina epóxi.

Finalmente, é possível considerar que nesse trabalho atingiu-se o principal objetivo proposto que seria a seleção de um método confiável para a determinação das propriedades mecânicas de compósitos de fibras vegetais. Além disso, foi possível obter valores dos Módulos de Elasticidade e Cisalhamento que podem servir de referência em estudos posteriores e foi concluído que as estruturas do tipo viga-sanduiche, preparadas com fibras de taquara-lixo sem tratamento químico, em matriz de resina epóxi, podem ter aplicação estrutural, semelhante às das melhores madeiras de eucalipto, com as vantagens da baixa absorção de água e do aproveitamento de uma fibra vegetal de baixo custo.

8 SUGESTÕES PARA SEQUÊNCIA DO TRABALHO

8.1 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE FIBRAS, NOS VALORES DAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

Pela grande importância que possui, para o completo conhecimento do material aqui pesquisado, podem-se recomendar na continuidade, ensaios, além de características intrínsecas da fibra sem tratamento químico, com tração das fibras e “*Pull-out*” em matriz de resina epóxi, também das características mecânicas dos compósitos de fibras longas e curtas de três diferentes frações volumétricas, no sentido de comprovar as observações feitas aqui e anteriormente, por outros pesquisadores, nesta linha de pesquisa, quando se concluiu que os Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento crescem com o incremento da Fração Volumétrica de Fibras no compósito e ainda verificar, se existe um limite para esse crescimento. Também, além disso, seria de interesse em vista dos resultados obtidos, fazer-se uma série de ensaios de compósitos reforçados com fibra de taquara-lixo, na direção transversal ao eixo principal do molde, com diversas frações volumétricas e para diversas cargas de moldagem (5 tf, 7 tf e 10 tf, por exemplo), e analisando todos esses resultados procurar-se estabelecer um método de previsão das características mecânicas dos compósitos desenvolvidos, com base nesse importante parâmetro (fração volumétrica de fibras), já que agora fica disponível uma ferramenta expedita e confiável para determinação simultânea dos dois módulos elásticos.

8.2 PESQUISAS COM OUTROS MATERIAIS COMPÓSITOS

Não abandonando a pesquisa de materiais alternativos para a fabricação de dormentes ferroviários seria interessante o prosseguimento de investigações buscando outras combinações de materiais naturais e artificiais para desenvolvimento de compósitos, assim como, por exemplo, matrizes de termoplásticos oriundos ou não do lixo reciclável, reforçadas com fibras vegetais de diversas espécies, tratadas com compatibilizantes químicos e outros agentes de acoplamento, avaliando-se inclusive, o efeito do índice de fluidez das matrizes, nas propriedades mecânicas dos materiais.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7511: 2013; - Dormentes de Madeira – Requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 24 p. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190: 1997; - Projetos de Estruturas de Madeira**, ABNT/CB-02. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 94 p. 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190: 2012; - Projetos de Estruturas de Madeira**, ABNT/CB-02. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 75 p. 2012.
- ALVES, G. K. A.; SINAY, M.C F. Os dormentes ferroviários, seu tratamento e o meio ambiente. In: III RIO DE TRANSPORTES, 3, 2005, Rio de Janeiro. **Anais ...**, Rio de Janeiro. 27 p. 2005.
- ALVES JUNIOR, C. A. **Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos de matriz poliéster com gravetos ou fibras de taquara (*Merostachys sp.*)**. Joinville, 2012. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Setor de Tecnologia, Universidade do Estado de Santa Catarina. 2012.
- ASTM D-198 - 2013. **Standard Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes**. – American Society for Testing and Materials. 2013.
- ASTM D-790 - 2010. **Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials** – American Society for Testing and Materials. 2010.
- ASTM D-7264/ D7264 M – 2007. **Standard Test Methods for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. American Society for Testing and Materials. 2007.
- ADHIKARI, R.; BHANDARI, N.L.; CAUSIN, V. LE, H.L.; RADUSCG, H.J.; MICHLER, G.H.; SAITER, J.M. - Study of Morphology, Mechanical Properties, and Thermal Behavior of Green Aliphatic-Aromatic Copolyester/Bamboo Flour Composites. **Polymer Engineering and Science**, New York, v.52, p. 2296-2303, 2012.
- ALMEIDA, M. I. A. **Comportamento estrutural de painéis sanduíche compósitos, para aplicações na indústria da construção**. Lisboa, 2009, 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Setor de Tecnologia, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2009.
- ANDRADE, Edmundo N. **O Eucalipto**. 2 ed. Jundiaí: Oficinas Tipográficas da Companhia Paulista de Estradas de Ferro, 1961.

ANNUNCIADO, T.R.; SYDENSTRICKER, T.H.D.; AMICO, S.C. - Experimental investigation of various vegetable fibers as sorbent materials for oil spills. **Marine Pollution Bulletin**, v. 50, p. 1340-1346, 2005.

BISWAS, S.; SATAPATHY, A. A comparative study on erosion characteristics of red mud filled bamboo-epoxy and glass-epoxy composites. **Materials and Design**, New York, v. 31, p. 1752-1767, 2010.

BLEDZKI, A.K.; GASSAN, J. Composites Reinforced with Cellulose Based Fibers. **Polymer Science**, v. 24, p. 221-272, 1999.

BOM, R.P; REIS, E.G. Propriedades mecânicas do compósito sanduíche feito com fibras longas e picadas de taquara-lixo e resina epóxi. Parte 1. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 12. Florianópolis, 2011. **Anais ...** Florianópolis/SC, Oceania Convention Center, 2013, volume único.

BOM, R.P; REIS, E.G. Análise estrutural de uma viga sanduíche feita de fibras de taquara-lixo com resina epóxi. Parte 2. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 12. Florianópolis, 2011. **Anais ...** Florianópolis, Oceania Convention Center, 2013, volume único.

BORGES NETO, C. **A utilização da madeira serrada de *pinus* na construção civil**. Curitiba, 1997. Monografia. Curso de Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. 37 p.

BRIGIDA, A.I.S. *et al.* (2010). Effect of Chemical Treatments on Properties of Green Coconut Fiber. **Carbohydrate Polymers**, v. 79, n.4, p.832-838, 2010.

BRINA, Helvécio L. **Estradas de Ferro**. 2 volumes. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S/A, 1979. v. 1, 258 p., Via Permanente; v. 2, Material rodante, tração e dinâmica dos trens. 215 p.

BROWNING, B. L. **The Chemistry of Wood**. New York, Interscience, 689 p. 2003.

CAI, G.; WANG, J.; NIE, Y. TIAN, X.; ZHU, X.; ZHOU, X. - Effect of toughening Agentes on the Behaviors of Bamboo Plastic Composites, **Polymer Composites**, New York, v. 32, p. 1945-1952, 2011.

CALLISTER JÚNIOR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 7. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 708p.

CARDOSO, P. H.; BASTIAN, F. L.; THIRÉ, R. S. M. Produção de laminados compósitos de epoxi/fibra de curauá. 12º CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 12. **Anais...**, Florianópolis/SC, 2013.

CONMETRO. Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Resolução nº 12, de 12 de outubro de 1988**. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/metlegal/resolucao11.asp>. Acesso em: 20 set. 2014.

DAS, M.; CHAKRABORTY, D. - Role of Mercerization of the Bamboo Strips on the Impact Properties and Morphology of Unidirectional Bamboo Strips-Novolac Composites. **Polymer Composites**, New York, v.28, p. 57-60, 2007.

DAS, M.; CHAKRABORTY, D. - Evaluation of improvements on physical and mechanical properties of bamboo fibers due to alkali treatment, **Journal of Applied Polymer Science**, New York v. 107, 522–527, 2008.

DAS, M.; CHAKRABORTY, D. - Effects of Alkalinization and Fiber Loading on the Mechanical Properties and Morphology of Bamboo Fiber Composites. , Part I: - Polyester Resin Matrix. **Journal of Applied Polymer Science**, New York,v. 112, p. 489-495, 2009.

DAS, M.; CHAKRABORTY, D. - Effects of Alkalinization and Fiber Loading on the Mechanical Properties and Morphology of Bamboo Fiber Composites. II. Resol Matrix. **Journal of Applied Polymer Science**, New York, v. 112, p. 447-453, 2009.

DAS, M.; PAL, A.; CHAKRABORTY, D. - Effects of Mercerization of Bamboo Strips on Mechanical Properties of Unidirectional Bamboo-Novolac Composites. **Journal of Applied Polymer Science**, New York, v. 100, p. 238-244, 2006.

FARHAT, F. B. Exemplo chinês: Bambu, uma planta estratégica. **Revista CREA.PR**, Curitiba/PR. p. 23, 1967.

FARIA, B. S. e SINAY, M. C. F. Utilização de embalagens plásticas na fabricação de dormentes ferroviários. In: II UFRJ AMBIENTÁVEL, 2., 2006, Rio de Janeiro. **Anais ...**, Rio de Janeiro: UFRJ, 2006.

FARIA, B. S. **Utilização de materiais reciclados na fabricação de dormentes ferroviários**. Rio de Janeiro, 2006. 19 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Setor de Tecnologia, Instituto Militar de Engenharia - IME, 2006.

FOLKES, M. J. **Short Fibre Reinforced Thermoplastics**. Uxbridge: John Wiley & Sons Ltd, 176 p. 1985. Letchworth, Herts, England.

FREDIANELLI, D. A. **Determinação do módulo de cisalhamento de compósitos de taquara a partir de ensaios de flexão de três pontos**. Trabalho de Conclusão (Eng. Mecânica), Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC/Joinville, 2013.

FUENTES, C.A.; TRAN, L.Q.N.; HELLEMONT M.V.; JANSSENS, V.; DUPONT-GILLAIN, C.; VUURE, A.W.V.; VERPOEST, I. **Effect of physical adhesion on mechanical behavior of bamboo fibre reinforced thermoplastic composites**. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, New York, v. 418, p. 7-15, 2013.

GIURGIUTIU, V; REINSFINDER, K. L.; KRIZ, R. D.; AHN, B. K.; LESKO, J. J.; **Influence of Fiber Coating and Interphase on the Design of Polymeric Composite Strength – Analytical Predictions**, 36th AUIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, New Orleans, April 9-12, 1995. Paper #AIAA-95-1212.

GOLDING, B. **Polymers and Resins. Their Chemistry and Chemical Engineering.** Princeton: D. Van Nostrand Company, Inc. 1959.

GUIMARÃES, J. L.; FROLLINI, E.; SILVA, C.G.; WYPYCH, F.; SATYANARAYANA, K.G. Characterization of banana, sugarcane bagasse and sponge gourds fibers of Brazil. **Industrial Crops and Products**, V. 30, p. 407-415, 2009.

GUPTA, A.; PATNAIK, A.; BISWAS, S. Effect of Different Parameters on Mechanical and Erosion Wear Behavior of Bamboo Fiber Reinforced Epoxy Composites. **International Journal of Polymer Science**, New York, v. 2011, p. 727- 737, 2011.

HUNG, K.C.; CHEN, Y.L.; WU, J.H. Natural weathering properties of acetylated bamboo plastic composites. **Polymer Degradation and Stability**, New York, v. 97, p. 1680-1685, 2012.

KIM, B.J.; YAO, F.; HAN, G.; WU, Q. Performance of Bamboo Plastic Composites with Hybrid Bamboo and Precipitated Calcium Carbonate Fillers. **Polymer Composites**, New York, v. 33, p. 68-78, 2012.

KIM, J.Y.; PECK, J.H.; HWANG S.H.; HONG J.; HONG, S.C.; HUH, W.; LEE, S.W. Preparation and Mechanical Properties of Poly(vinyl chloride)/Bamboo Flour Composites with a Novel Block Copolymer as a Coupling Agent. **Journal of Applied Polymer Science**, New York, v. 108, p. 2654-2659, 2008.

KUSHWAHA, P.K.; KUMAR, R. Bamboo Fiber Reinforced Thermosetting Resin Composites: Effect of Graft Copolymerization of Fiber with Methacrylamide. **Journal of Applied Polymer Science**, New York, v. 118, p. 1006-1013, 2010.

LACERDA, F. S. **Resistência dos Materiais**. 2 volumes. 4 ed. Porto Alegre/RS, Globo S. A., 1964. v.2 e 3. 952p. (Resistência dos Materiais).

LIEBSCH, D; REGINATO, M. Florescimento e frutificação de *Merostachys skvortzovii* Sendulsky (taquara-lixá) no estado do Paraná, **Iheringia, Sér. Bot.**, Porto Alegre, v. 64, n.1, p. 53-56, 2009.

LIESE, W. **Bamboos – Biology, Silvics, Properties, Utilization**. Estocolm, Sweden, GTZ, 1985. 218 p.

LIU, H; WU, Q.; HAN, G.; YAO, F.; KOJIMA, Y.; SUZUKI, S. Compatibilizing and toughening bamboo flour-filled HDPE composites: Mechanical properties and morphologies. **Composites: Part A**. New York, v. 39, p. 1891-1900, 2008.

LOPES, G. L. **Herbário Online**. Disponível em: <http://sites.unicentro.br/wp/manejoflorestal/taquara-lixá>. Acesso em: 08 set. 2014.

LOPEZ, O.H. **Bamboo, The Gift of the Gods**. Bogotá, Colômbia: Lopez, 2003. 553 p.

- LOZOVEI, A.L. Microhabitats de mosquitos (Diptera, culicidae) em internódios de taquara na mata Atlântica, Paraná, Brasil. **Iheringia, Sér. Zool**, Porto Alegre/RS, v. 90, n. 90, p. 3-13, 2001.
- MARQUEZ, F. L.; MEIRELLES, C. R. M. Arquitetura em Bambu: Técnicas construtivas na utilização do bambu como material arquitetônico. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA PIBIC e PIVIC, 3., 2007, São Paulo/SP. **Anais...**São Paulo/SP, Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2007. p. 1-28.
- MARTINS, T. F. R. M. **Dimensionamento em Estruturas de Madeira – Coberturas e Pavimentos**, Dissertação (Mestrado), Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2010.
- MARTINS, L. B. S.; MARGEN, F. M.; MONTEIRO, S. N.; LOIOLA, R. L. Tensile resistance of poliéster matrix composites reinforced with bamboo fibers of the species *dendrocalamus giganteus*. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - CBECIMAT, 20, **Anais...**Joinville, 2012. 4237. 206-038.
- MARZOLA, G. **Alternativas viáveis para substituição da madeira como dormente ferroviário**. São Paulo, 2004. 57 f. Trabalho (Graduação), Curso em Engenharia Civil, Setor de Tecnologia. Universidade Anhembí Morumbi.
- ORESTEN, L. F. **Caracterização dinâmica de vigas Sandwich, com núcleo de espuma rígida de poliuretano**. Curitiba, 2003. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Setor de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica – PUC/PR. 2003.
- OSORIO, L; TRUJILLO, E; VAN VUURE, A.W; VERPOEST, I. Morphological aspects and mechanical properties of single bamboo fibers and flexural characterization of bamboo/epoxy composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v.30(5), 396-408, 2011.
- PARK, S; BAKER, J; HIMMEL, M.E; PARILLA, P.A; JOHNSON, D.K. - Cellulose crystallinity index: measurement techniques and their impact on interpreting cellulose performance. **Biotechnology for Biofuels**, 1-10, 2010.
- PEREIRA, M.A. **Bambu: espécies, características e aplicações**. Bauru – SP /Editora da UNESP, 58 p. 2001.
- PHUONG, N.T.; CHUONG, B.; GUINAULT, A.; SOLLOGOUB, C. Morphology and properties of recycled polypropylene/bamboo fibers composites. In: 14th INTERNATIONAL ESAFORM CONFERENCE ON MATERIAL FORMING, 14, 2011, New York. **Proceedings of the 14th International ESAFORM Conference on Material Forming**. New York, 2011, p. 732-737.
- PFEIL, W; PFEIL, M. **Estruturas de Madeira** – Ed. Livros Técnicos e Científicos Ltda – LTC. Rio de Janeiro/RJ, 2003.
- PINZON, T. M. **Ensayo preliminar de contenido de azúcar en la guadua**. Relatório técnico. Pereira, Colômbia: FMA, 12p. 2002.

RAJULU, A. Varada; CHARY, K. Narasimha; REDDY, G. Ramachandra e MENG, Y. Z. Void content, density and weight reduction studies on short bamboo fiber-epoxy composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, Stanford, v. 23; 127, 2004.

RAMÍREZ, M.G.L. **Caracterização de biocompósitos de amido termoplástico reforçado com fibra de coco verde**. Curitiba, 2011, 166p. Tese. (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

REIS, E. G. **Compósitos de fibras de taquara (*Merostachys sp.*) e matriz de poliéster e epóxi**. Joinville, 2013. 105f. Dissertação. (Mestrado em Ciências e Engenharia dos Materiais) – Setor de Tecnologia, Universidade do Estado de Santa Catarina.

SATYANARAYANA, K.G.; FLORES-SAHAGUN, T.H.S.; MAZZARO, I.; SUKUMARAN, K.; GUPALAKRISHNA, P.; RAVIKUMAR, K.K. - Characterization of Aechmea Magdalenae leaf yarns. **Journal of Biobased Materials and Bionergy**, V. 8, 1-8, 2014.

SATYANARAYANA, K.G.; FLORES-SAHAGUN, T.H.S.; SANTOS, L.P.D.; SANTOS, J.D.; MAZZARO, I.; MIKOWSKI, A. Characterization of blue agave bagasse fibers of Mexico. **Composites: Part A**, V. 45, p. 153-161, 2013.

SEGAL, L.C.; CONRAD, C.M. - Characterization of cellulose derivatives by means of x-ray diffractometer , *American Dyestuff Reports*, **46**, 637-642, (1957).

SEGAL L. C.; CREELY J. J.; MARTIN, A. E.; CONRAD C.M. An empirical method for estimating of cristallinity of native cellulose using the x-ray diffractometer, *Textile Research Journal* **29**, 786-794 (1959).

SEGAL, L.C.; MARTIN, A. E. Jr; CONRAD, C.M. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the x-ray diffractometer. **Tex, res. J.** v. 29, 786-794, 1962.

SELLERS JR. Adhesive in the Wood Industry. In: PIZZI. A.; MITTAL, K.L. **Handbook of Adhesive Technology**. New York: Marcel Dekker, 1994. Cap. 37.

SHIH, Y.F. Mechanical and thermal properties of waste water bamboo husk fiber reinforced epoxy composites. **Materials Science and Engineering A**, New York, v. 445-446, p. 289-295, 2007.

SMITH, L.B; WASSHAUSEN, D.C; KLEIN, R.M. **Flora Ilustrada Catarinense**, N.Gram,1981. p. 911-1099.

SOUZA JUNIOR, F. G. S.; PICCIAN, P. H. S.; ROCH, E. V.; Estudo das propriedades mecânicas e elétricas de fibras de curauá modificada com polianilina. **Polímeros Ciência e Tecnologia**, v. 20, n.5, 2010. p.377-382.

SPIEGEL, M. R. **Manual de fórmulas e tabelas matemáticas**. Coleção Schaum – Editora Mc Graw-Hill do Brasil Ltda. São Paulo/SP. 269 p. 1974

SPIEGEL, M. R. **Estatística**. Coleção Schaum - Editora Mc Graw-Hill do Brasil Ltda. São Paulo/SP. 579 p. 10ª reimpr. 1977.

SYDENSTRICKER, T.H.D.; MOCHNAZ, S.; AMICO, S.C. Pull-out and other evaluations in sisal-reinforced polyester biocomposites. **Polymer Testing**, V. 22, p. 375-380, 2003.

TANOBE, V.O.A.; SYDENSTRICKER, T.H.D.; MUNARO, M.; AMICO, S.C. A comprehensive characterization of chemically treated Brazilian sponge-gourds (*Luffa cylindrica*). **Polymer Testing**, V. 24, p. 474-482, 2005.

TIETEK COMPOSITE TIES. **Innovation from the ground up**. Disponível em: <http://www.tietek.com/product>. Visualizado em 10 jul, 2006.

TIMOSHENKO, S. F.; GERE, J. E. **Mecânica dos sólidos 1**. Rio de Janeiro: LTC, 1999. 256 p.

TIMOSHENKO, S. F.; GERE, J. E. **Mecânica dos sólidos 2**. Rio de Janeiro: LTC, 1999. 450 p.

TOGNO, F. M. **Ferrocarriles**. Mexico:Representaciones y Servicios de Ingenieria, S.A. 749 p. 1968.

TOMCZAK, F.; SYDENSTRICKER, T.H.D.; SATYANARAYANA, K.G. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part II: Morphology and Properties of Brazilian Coconut Fibers. **Composites: Part A**, v. 38, p. 1710-1721, 2007.

TOMCZAK, F.; SYDENSTRICKER, T.H.D.; SATYANARAYANA, K.G. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil: Part III: Morphology and Properties of Brazilian Curauá Fibers. **Composites: Part A**, v. 38, p. 2227-2236, 2007.

TROMBETTA, E. **Utilização de fibra natural de Pinus (serragem) como reforço em componentes automotivos compostos de polipropileno**. Curitiba, 2010, 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

VERMA, C.S.; CHARIAR, V.M. Stiffness and strenght analysis of furlayeed laminate bamboo composite at macroscopic scale. **Composites: Part B**, New York, v.45, p. 369-376, 2013.

WEGST, U.G.K. Bending efficiency through property gradients in bamboo, palm, and Wood-based composites. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**. New York, v. 4, 744-755, 2011.

WONG, K.J.; ZAHI, S.; LOW, K.O.; LIM, C.C. - Fracture characterization of short bamboo fibre reinforced polyester composites. **Materials and Design**, New York, v. 31, p. 4147-4154, 2010.

XUE. H.; CHEN, Q.; LIN, J. Preparation and Characterization of Bamboo Fibers Coated with Urushiol-Ferric and its Composite with Polypropylene. **Journal of Applied Polymer Science**, New York, v. 125, p. 439-447, 2012.

ZENKERT, D. **An Introduction to Sandwich Construction**. London: Engineering Materials Advisory Services Ltd. EMAS Publishing, 277 p. 1995.

APÊNDICES

APÊNDICE A – GRÁFICOS DE “FORÇA VS. DEFORMAÇÃO” DE TODOS OS ENSAIOS, REFERENTES À PRIMEIRA PARTE DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL (PRIMEIRA E SEGUNDA ETAPAS).

Figura A.1 – CP1 A e B

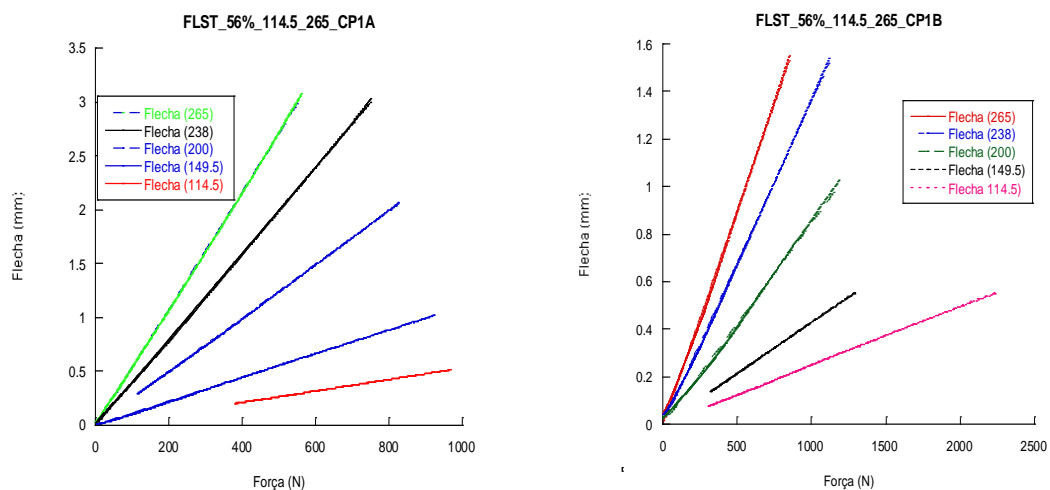


Figura A.2 – CP2 A e B

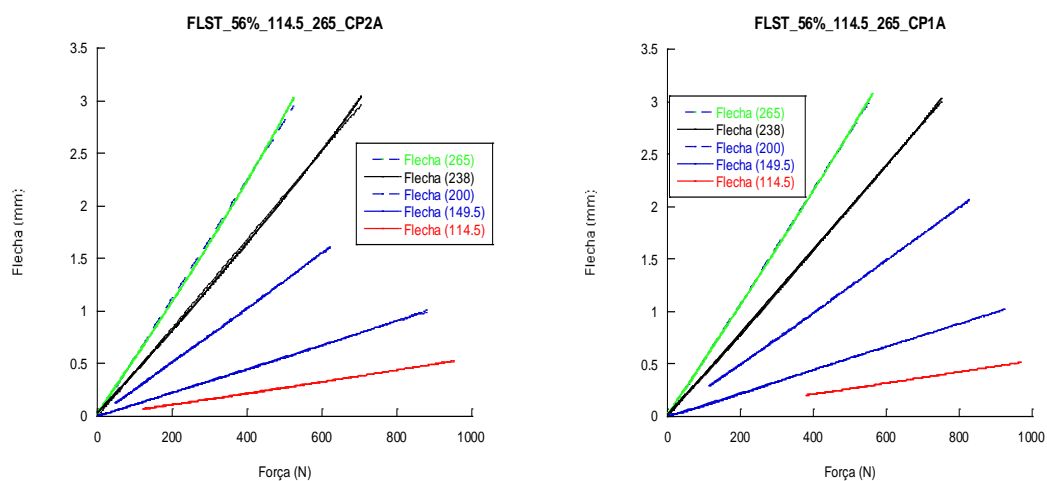


Figura A.3 – CP3 A e B

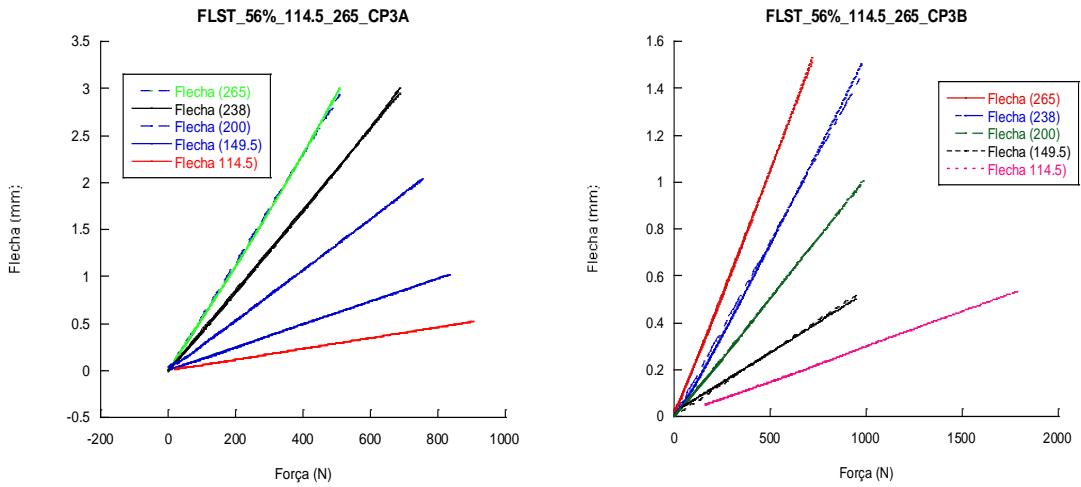


Figura A.4 – CP4 A e B

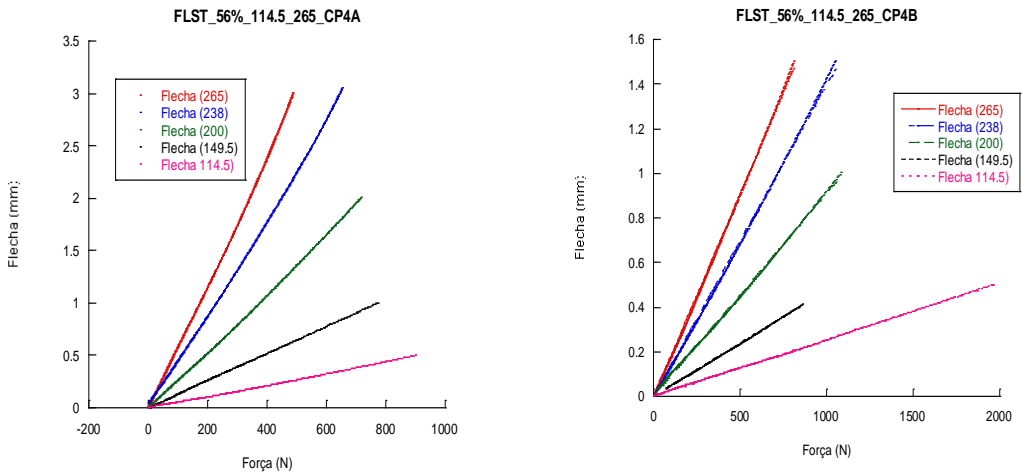


Figura A.5 – CP5 A e B

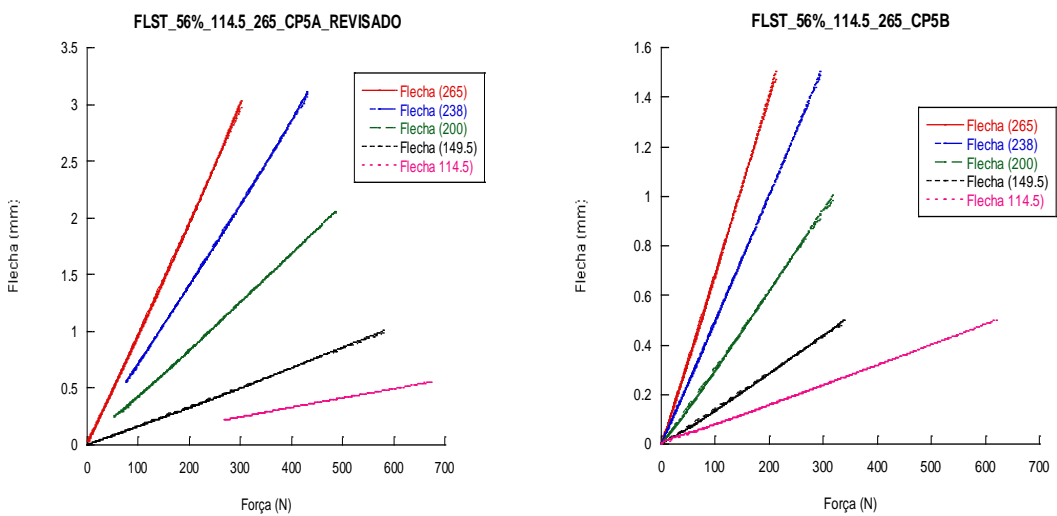


Figura A.6 – CP6 A e B

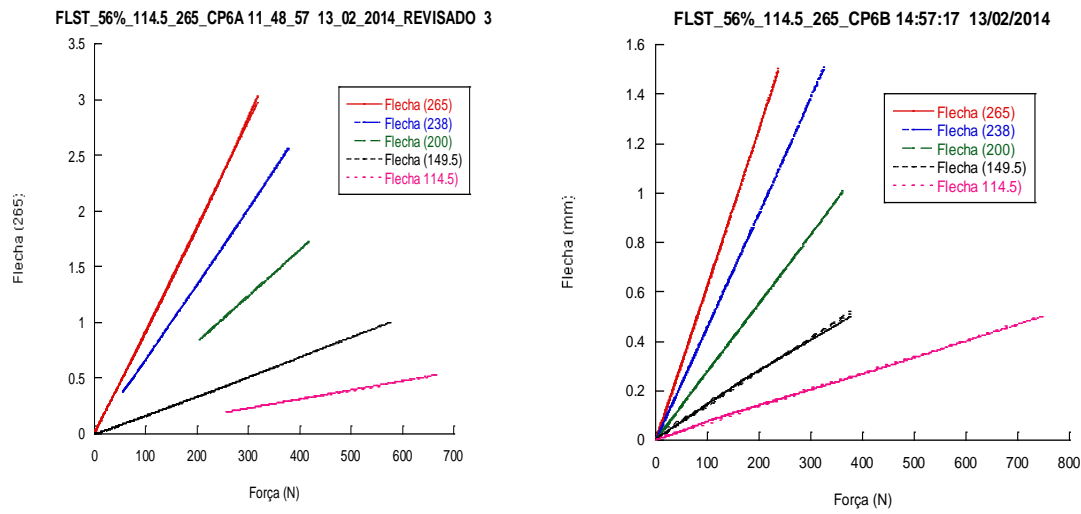
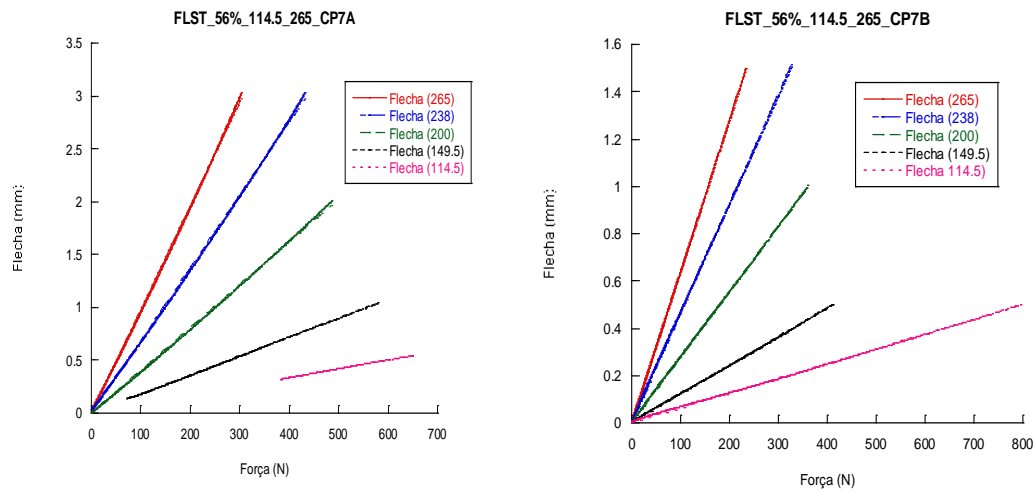


Figura A.7 – CP7 A e B



APÊNDICE B - GRÁFICOS E TABELAS CORRESPONDENTES À DISCUSSÃO DA SEGUNDA ETAPA, DA PRIMEIRA PARTE, DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.

Tabela A.1 – Módulos de Elasticidade e Cisalhamento – Timoshenko - CP1 – A e B

CP1	Posição A		Posição B	
Dimensões	h= 13,27 (mm)	b= 22,82(mm)	h= 22,82(mm)	b= 13,27(mm)
Vão	Módulo E	Módulo G	Módulo E	Módulo G
265	16 850	802	17 390	1 196
238	16 420	994	15 890	1 153
200	15 820	1 013	15 820	1 468
149,5	15 210	1 065	14 814	1 092
114,5	14 690	1 117	14 145	919

Tabela A.2 – Diferenças entre flechas simuladas e experimentais – CP1 – A e B

CP1	Posição A				Posição B			
Vão	Flecha Simulada (mm)	Força (N)	Flecha Exp. (mm)	Diferença (%)	Flecha Simulada (mm)	Força (N)	Flecha Exp. (mm)	Diferença (%)
265	2,700	500	2,717	-0,6	1,053	550	0,993	6,0
238	2,038	500	1,988	2,5	0,779	500	0,676	15.2
200	1,264	500	1,245	1,5	0,662	700	0,594	11.5
149,5	0,601	500	0,559	7,5	0,406	800	0,344	18,0
114,5	0,403	650	0,346	16,5	0,445	1500	0,375	18.6

Figura A.8 – Módulos de Elasticidade vs. Distância entre apoios – CP1, Posições A e B

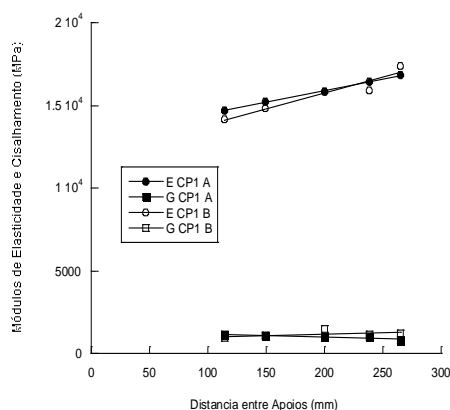


Figura A.9 – Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento vs. Razão h/L, CP1, Posições A e B.

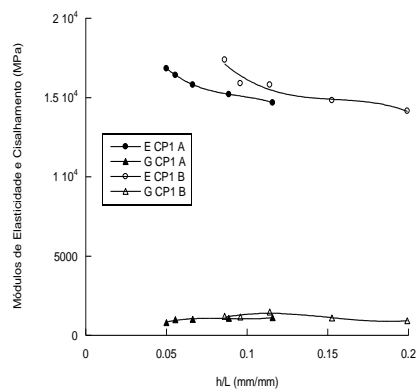


Figura A.10 – Diferenças entre Flechas Experimental e Simulada vs. Razão h/L, CP1, Posições A e B.

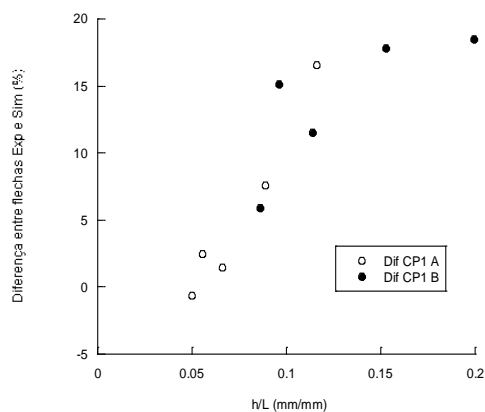


Tabela A.3 – Módulos de Elasticidade e Cisalhamento – Timoshenko - CP2 – A e B

CP2	Posição A		Posição B	
Dimensões	h= 13,15(mm)	b= 23,09(mm)	h= 23,09(mm)	b= 13,15(mm)
Vão	Módulo E	Módulo G	Módulo E	Módulo G
265	16 280	905	16 240	998
238	15 890	921	15 280	992
200	15 460	999	15 630	975
149,5	15 120	1 062	14 470	1 004
114,5	14 680	1 029	13 560	865

Tabela A.4– Diferenças entre flechas simuladas e experimentais – CP2 – A e B

CP2	Posição A				Posição B			
Vão	Flecha Simulada (mm)	Força (N)	Flecha Exp. (mm)	Diferença (%)	Flecha Simulada (mm)	Força (N)	Flecha Exp. (mm)	Diferença (%)
265	2283	400	2,247	1,6	1014	500	0,962	5,4
238	2,364	550	2,309	-2,4	1,071	650	0,976	9,7
200	1,480	550	1,426	-3,8	0,652	650	0,595	9,6
149,5	0,599	500	0,558	-7,3	0,300	600	0,264	13,6
114,5	0,381	600	0,328	-16,2	0,474	1550	0,407	16,5

Figura A.11– Módulos de Elasticidade vs. Distância entre apoios – CP2, Posições A e B.

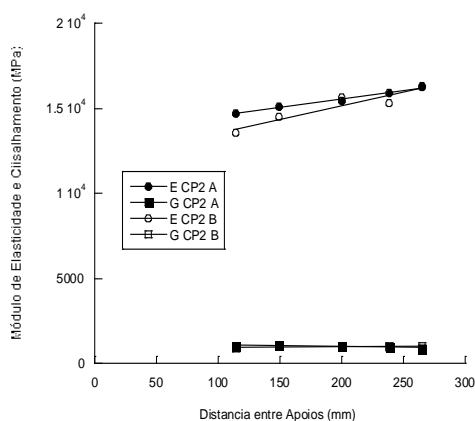


Figura A.12– Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento vs. Razão h/L, CP2, Posições A e B.

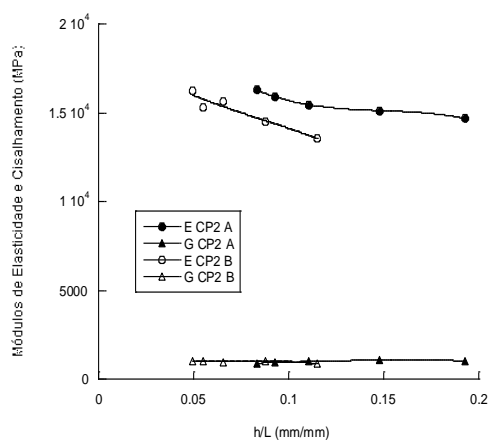


Figura A.13 – Diferenças entre Flechas Experimental e Simulada vs. Razão h/L, CP2, Posições A e B.

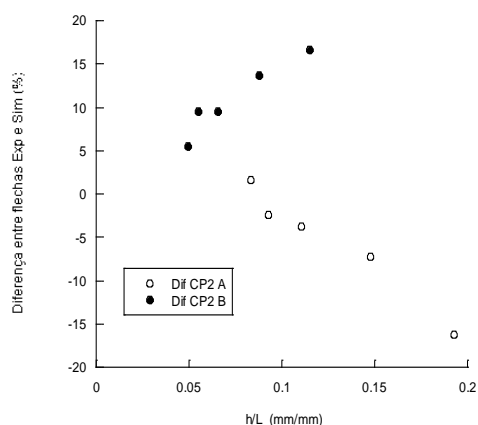


Tabela A.5 – Módulos de Elasticidade e Cisalhamento – Timoshenko - CP3 – A e B

CP3	Posição A		Posição B	
Dimensões	h= 13,35(mm)	b= 23,18(mm)	h= 23,18(mm)	b= 13,35(mm)
Vão	Módulo E	Módulo G	Módulo E	Módulo G
265	14 980	1 077	14 218	1 053
238	14 760	978	14 720	1 070
200	14 095	1 013	13 941	877
149,5	13 859	806	13 181	700
114,5	13 942	878	12 698	721

Tabela A.6 – Diferenças entre flechas simuladas e experimentais – CP3 – A e B

CP3	Posição A				Posição B			
Vão	Flecha Simulada (mm)	Força (N)	Flecha Exp. (mm)	Diferença (%)	Flecha Simulada (mm)	Força (N)	Flecha Exp. (mm)	Diferença (%)
265	2,351	400	2,310	1,8	1,214	550	1,162	4,5
238	1,751	400	1,693	3,4	1,040	650	0,978	6,3
200	1,550	550	1,473	5,2	0,711	650	0,663	7,2
149,5	0,713	550	0,671	6,3	0,321	550	0,299	7,4
114,5	0,429	650	0,374	14,7	0,470	1400	0,420	11,9

Figura A.14 – Módulos de Elasticidade vs. Distância entre apoios – CP3, Posições A e B.

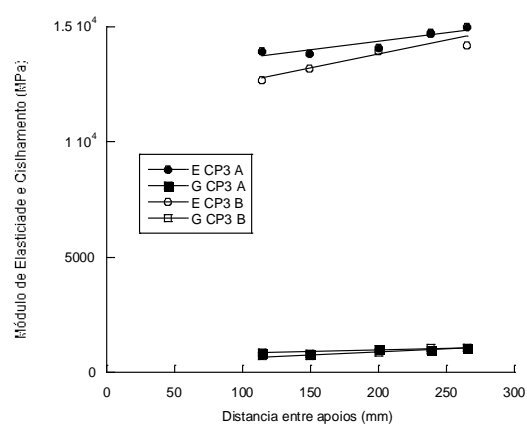


Figura A.15 – Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento vs. Razão h/L, CP3, Posições A e B.

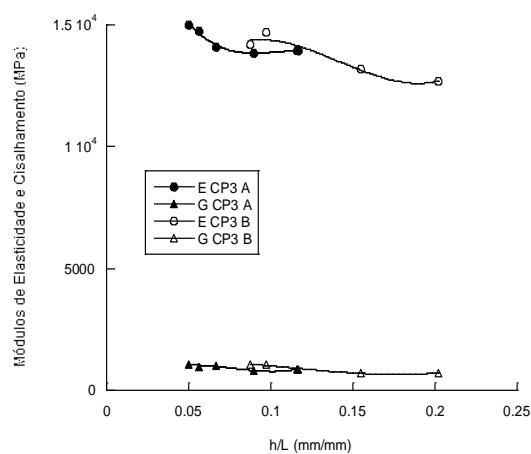


Figura A.16 – Diferenças entre Flechas Experimental e Simulada vs. Razão h/L, CP3, Posições A e B.

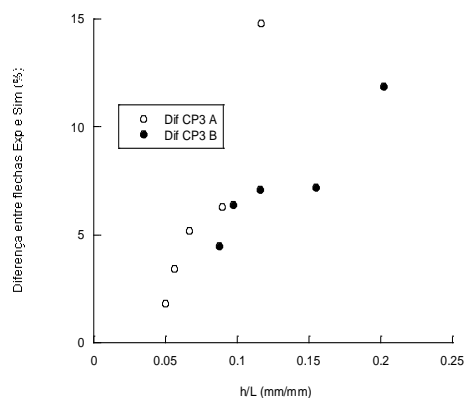


Tabela A.7 – Módulos de Elasticidade e Cisalhamento – Timoshenko - CP4 – A e B

CP4	Posição A		Posição B	
Dimensões	h= 13,42(mm)	b= 22,96(mm)	h= 22,96(mm)	b= 13,42(mm)
Vão	Módulo E	Módulo G	Módulo E	Módulo G
265	14 540	903	16 960	1 085
238	13 987	880	16 820	919
200	13 891	878	15 560	960
149,5	13 830	557	13 996	899
114,5	14 240	992	13 791	873

Tabela A.8 – Diferenças entre flechas simuladas e experimentais – CP4 – A e B

CP4	Posição A				Posição B			
Vão	Flecha Simulada (mm)	Força (N)	Flecha Exp. (mm)	Diferença (%)	Flecha Simulada (mm)	Força (N)	Flecha Exp. (mm)	Diferença (%)
265	2,402	400	2,386	0,7	1,059	550	0,998	6,1
238	2,538	55	2,496	1,7	0,972	650	0,905	7,4
200	1,410	500	1,364	3,4	0,653	650	0,587	11,2
149,5	0,634	500	0,647	-2,1	0,321	600	0,279	15,1
114,5	0,465	750	0,423	9,9	0,405	1350	0,349	16,0

Figura A.17– Módulos de Elasticidade vs. Distância entre apoios – CP4, Posições A e B.

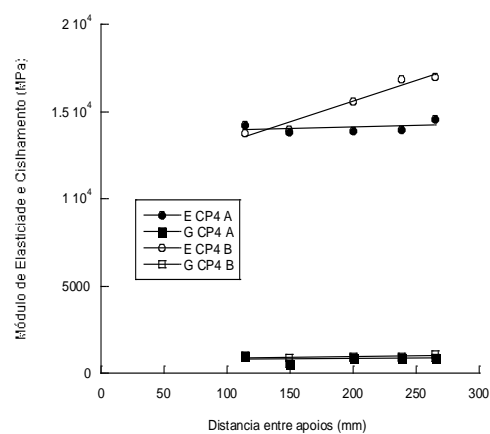


Figura A.18– Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento vs. Razão h/L, CP4, Posições A e B.

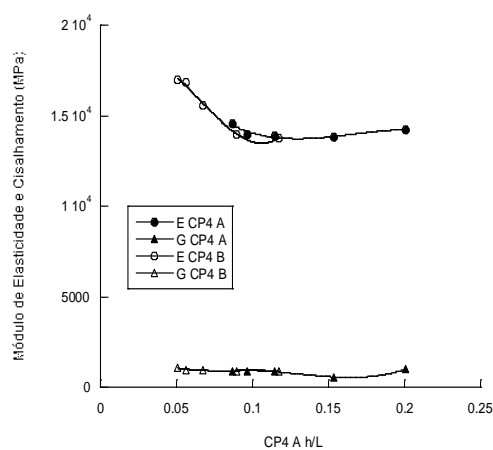


Figura A.19– Diferenças entre Flechas Experimental e Simulada vs. Razão h/L, CP4, Posições A e B.

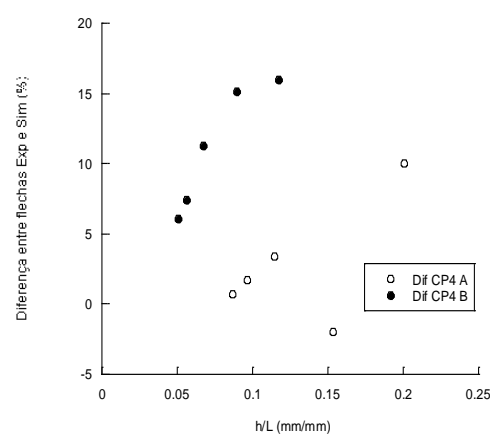


Tabela A.9 – Módulos de Elasticidade e Cisalhamento – Timoshenko - CP5 – A e B.

CP5	Posição A		Posição B	
Dimensões	h= 15,21(mm)	b= 19,34(mm)	h= 19,34(mm)	b= 15,21(mm)
Vão	Módulo E	Módulo G	Módulo E	Módulo G
265	7 026	1 069	6 320	637
238	7 054	1 211	6 392	632
200	7 084	1 253	6 447	569
149,5	7 292	2 081	6 550	506
114,5	7 148	1 084	6 517	455

Tabela A.10– Diferenças entre flechas simuladas e experimentais – CP5 – A e B.

CP5	Posição A				Posição B			
Vão	Flecha Simulada (mm)	Força (N)	Flecha Exp. (mm)	Diferença (%)	Flecha Simulada (mm)	Força (N)	Flecha Exp. (mm)	Diferença (%)
	2,029	200	1,956	3,7	1,420	200	1,411	0,6
238	1,484	200	1,413	5,0	1,036	200	1,008	2,8
200	1,358	300	1,260	7,8	0,955	300	0,951	0,4
149,5	0,788	400	0,680	15,9	0,433	300	0,442	-2,1
114,5	0,418	400	0,333	25,5	0,236	300	0,240	-1,7

Figura A.20– Módulos de Elasticidade vs. Distância entre apoios – CP5, Posições A e B.

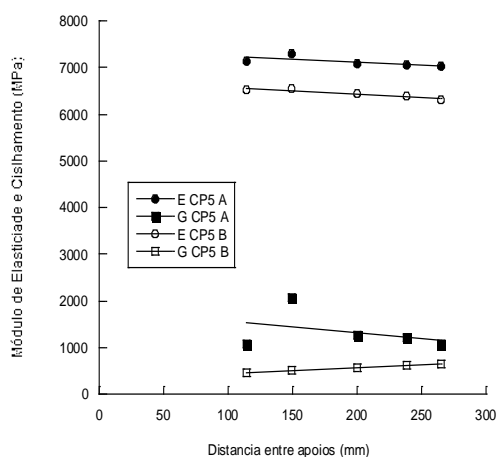


Figura A.21– Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento vs. Razão h/L, CP5, Posições A e B.

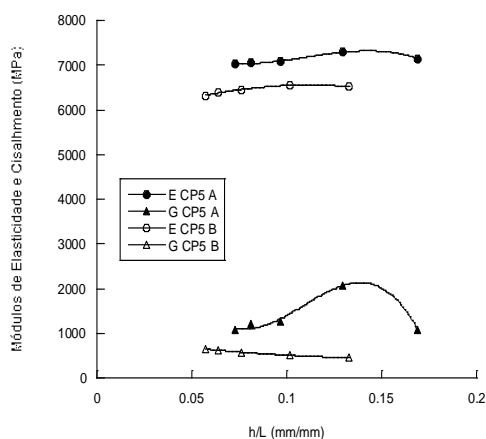


Figura A.22– Diferenças entre Flechas Experimental e Simulada vs. Razão h/L, CP5, Posições A e B.

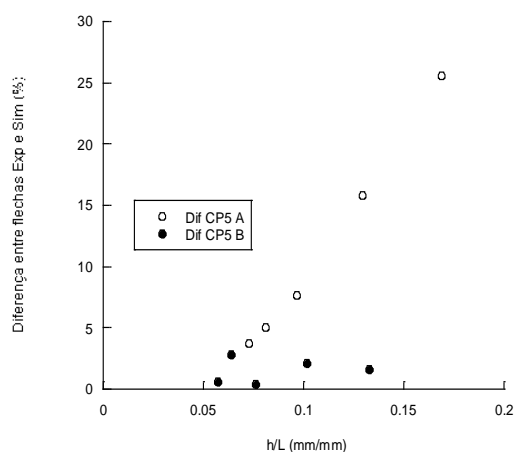


Tabela A.11 – Módulos de Elasticidade e Cisalhamento – Timoshenko - CP6 – A e B

CP6	Posição A		Posição B	
Dimensões	h= 15,19(mm)	b= 19,13(mm)	h= 19,13(mm)	b= 15,19(mm)
Vão	Módulo E	Módulo G	Módulo E	Módulo G
265	7 480	1 450	7 062	1 180
238	7 580	1 067	7 051	1 073
200	7 320	1 232	7 057	1 033
149,5	7 350	1 866	6 845	571
114,5	7 347	1 449	6 731	646

Tabela A.12 – Diferenças entre flechas simuladas e experimentais – CP6 – A e B

CP6	Posição A				Posição B			
Vão	Flecha Simulada (mm)	Força (N)	Flecha Exp. (mm)	Diferença (%)	Flecha Simulada (mm)	Força (N)	Flecha Exp. (mm)	Diferença (%)
265	2,375	250	2,344	1,3	1,283	200	1,267	1,3
238	2,062	300	2,025	1,8	1,182	250	1,155	2,3
200	1,282	300	1,250	2,6	0,718	250	0,694	3,5
149,5	0,548	300	0,510	7,4	0,143	200	0,142	0,7
114,5	0,466	500	0,396	17,7	0,417	300	0,407	2,5

Figura A.23– Módulos de Elasticidade vs. Distância entre apoios – CP6, Posições A e B.

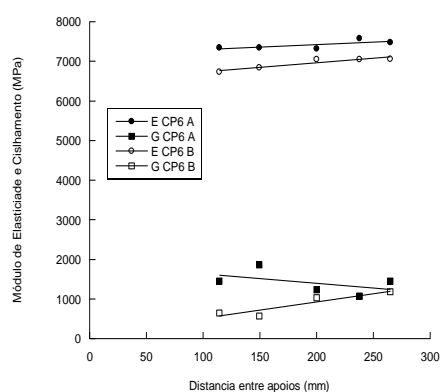


Figura A.24 – Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento vs. Razão h/L, CP7, Posições A e B.

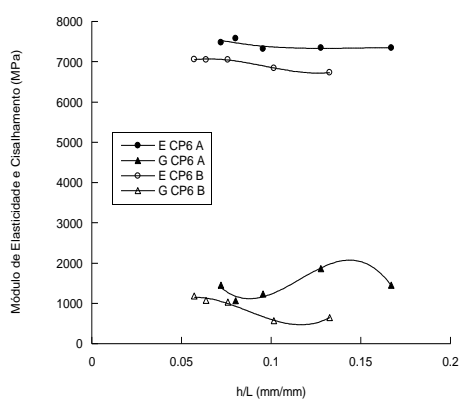


Figura A.25– Diferenças entre Flechas Experimental e Simulada vs. Razão h/L, CP6, Posições A e B.

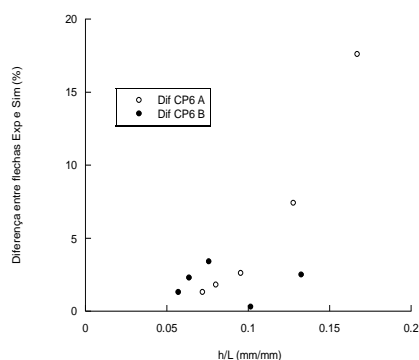


Tabela A.13 – Módulos de Elasticidade e Cisalhamento – Timoshenko - CP7 – A e B

CP7	Posição A		Posição B	
Dimensões	h= 15,08(mm)	b= 19,00(mm)	h= 19,00(mm)	b= 15,08(mm)
Vão	Módulo E	Módulo G	Módulo E	Módulo G
265	7 436	682	7 088	1 348
238	7 820	720	7 116	1 385
200	7 839	1 190	7 130	1 251
149,5	7 590	928	7 117	1 057
114,5	7 460	1 018	6 920	836

Tabela A.14 – Diferenças entre flechas simuladas e experimentais – CP7 – A e B

CP7	Posição A				Posição B			
Vão	Flecha Simulada (mm)	Força (N)	Flecha Exp. (mm)	Diferença (%)	Flecha Simulada (mm)	Força (N)	Flecha Exp. (mm)	Diferença (%)
265	1,960	200	1,948	0,6	1,308	200	1,281	4,6
238	1,361	200	1,358	0,2	0,952	200	0,925	2,9
200	0,820	200	0,792	3,5	0,721	250	0,695	3,7
149,5	0,547	300	0,539	1,5	0,317	250	0,303	4,6
114,5	0,467	500	0,422	10,7	0,338	500	0,312	8,3

Figura A.26.– Módulos de Elasticidade vs. Distância entre apoios – CP7, Posições A e B.

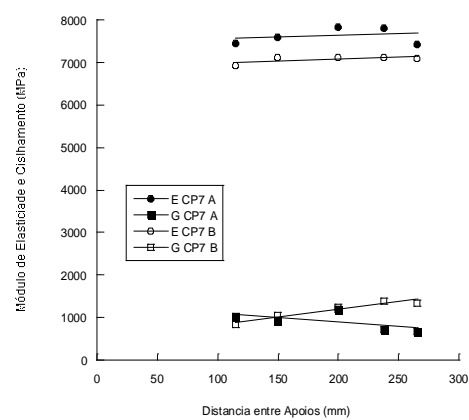


Figura A.27 – Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento vs. Razão h/L, CP7, Posições A e B.

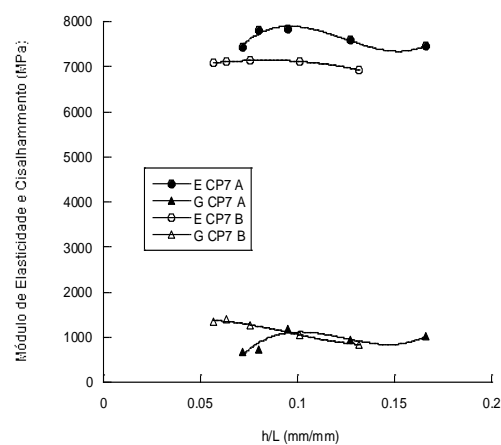
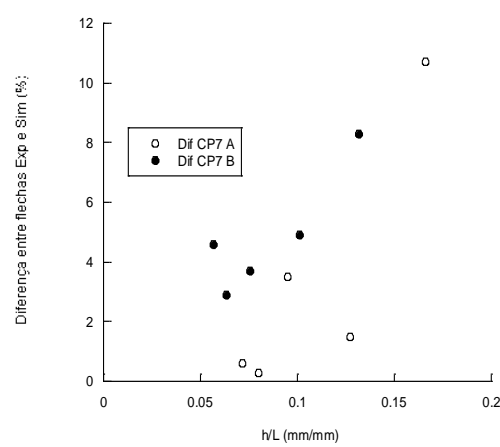


Figura A.28– Diferenças entre Flechas Experimental e Simulada vs. Razão h/L, CP7, Posições A e B.



APÊNDICE C - TABELAS COMPARATIVAS DE VALORES DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE E DE CISALHAMENTO ASTM VS. TIMOSHENKO (PRIMEIRA PARTE)

Tabela A.15 - Médias dos valores para os cinco vãos ensaiados, dos módulos de elasticidade e de cisalhamento, considerando os valores obtidos pelo Método dos Vãos Variáveis, ASTM D-198-2013, consideradas as posições A e B.

CP	E/A – ASTM (MPa)	G/A – ASTM (MPa)	E/B – ASTM (MPa)	G/B – ASTM (MPa)
CP1	17 057±223	986±84	19 806±323	890±25
CP2	16 015±209	1 082±109	15 975±469	857±47
CP3	14 964±379	872±142	16 607±777	660±45
CP4	14 029±303	1 735±514	18 330±781	833±60
MEDIA FL	15 516±654	1 169±193	17 680±866	810±52
CP5	7302±829	364±109	7 145±197	2 409±1915
CP6	7 585±246	536±66	7 522±27	1 944±194
CP7	7 502±154	890±118	8 425±516	691±300
MEDIA FC	7 463±84	596±155	7 696±380	1 690±514

Tabela A.16 - Médias dos valores para os cinco vãos ensaiados, dos módulos de elasticidade e de cisalhamento, considerando os valores obtidos pela aplicação da Equação da Teoria das Vigas de Timoshenko, consideradas as posições A e B.

CP	E/A – TIMOSH (MPa)	G/A – TIMOSH (MPa)	E/B – TIMOSH (MPa)	G/B – TIMOSH (MPa)
CP1	15 798±320	998±54	15 612±551	1166±89
CP2	15 486±281	983±31	15 036±467	967±26
CP3	14 327±228	950±48	13 752±362	884±79
CP4	14 098±131	842±74	15 425±672	947±37
MEDIA FL	14 927±209	943±28	14 956±293	991±37
CP5	6 445±42	560±35	7 121±47	1 337±189
CP6	6 998±57	1 027±66	7 415±50	1 413±134
CP7	7 074±39	1 175±102	7 629±86	908±94
MEDIA FC	6 839±79	970±90	7 388±65	1 220±98

Tabela A.17 - Médias dos valores dos módulos de elasticidade e de cisalhamento, considerando apenas os valores obtidos pela aplicação da Equação da Teoria das Vigas de Timoshenko, para os vãos 265 mm e 238 mm, consideradas as posições A e B.

CP	E/A – TIMOSH (MPa)	G/A – TIMOSH (MPa)	E/B – TIMOSH (MPa)	G/B – TIMOSH (MPa)
CP1	16 635±215	898±96	16 649±750	1 175±22
CP2	16 085±195	913±8	15 760±480	995±3
CP3	14 870±110	1 028±50	14 469±251	1 061±9
CP4	14 263±276	892±12	16 890±70	1 002±83
MEDIA FL	15 463±365	933±29	15 940±399	1 058±32
CP5	6 356±36	635±3	7 040±14	1 140±71
CP6	7 057±6	1 127±54	7 530±50	1 259±192
CP7	7 102±14	1 367±19	7 628±192	701±19
MEDIA FC	6 838±153	1 043±137	7 399±126	1 033±120

APÊNDICE D – GRÁFICOS DE “FORÇA VS. DEFORMAÇÃO” DE TODOS OS ENSAIOS, REFERENTES À SEGUNDA PARTE DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.

Figura A.29 – BL1 CP1, Posições A e B.

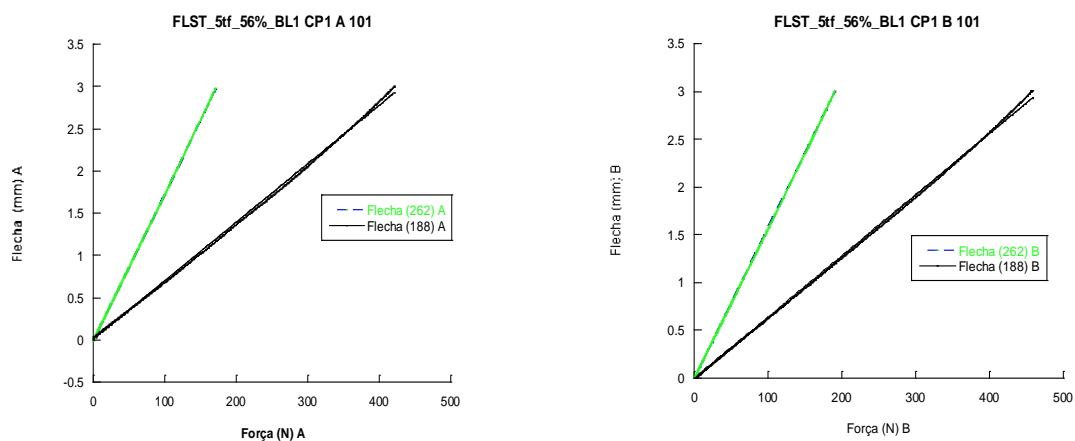


Figura A.30 – BL1 CP2, Posições A e B.

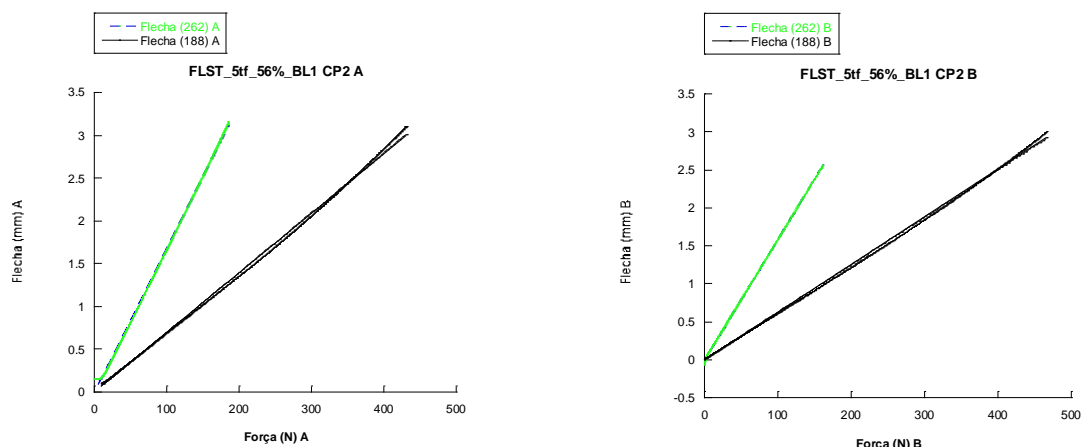


Figura A.31 – BL1 CP3, Posições A e B.

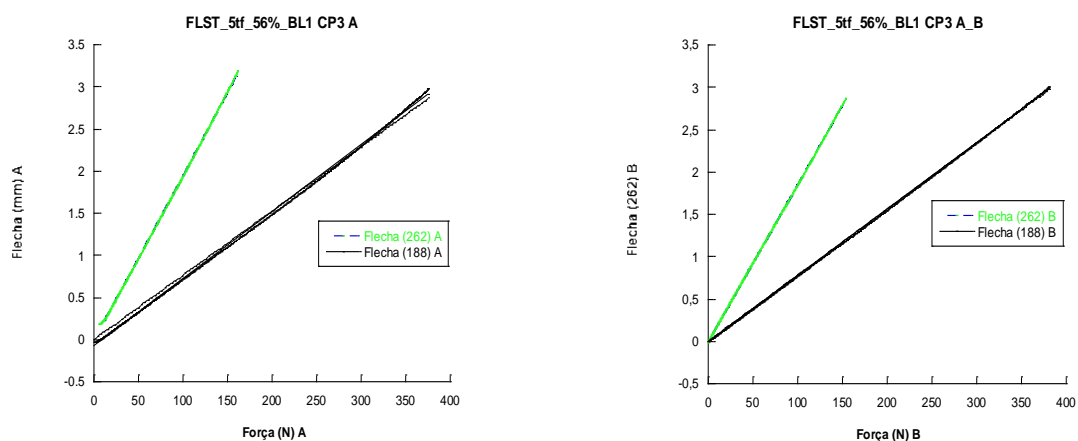


Figura A.32 – BL1 CP4, Posições A e B.

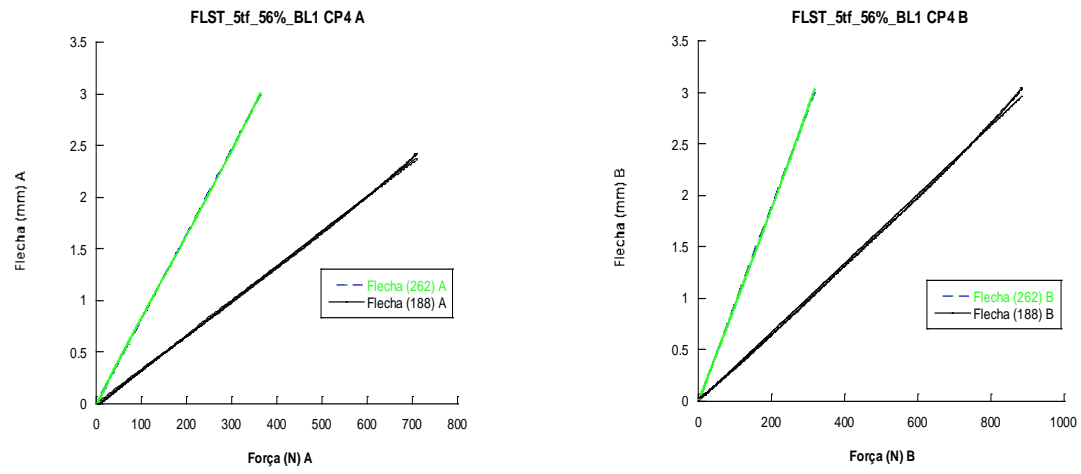


Figura A.33 – BL1 CP5, Posições A e B.

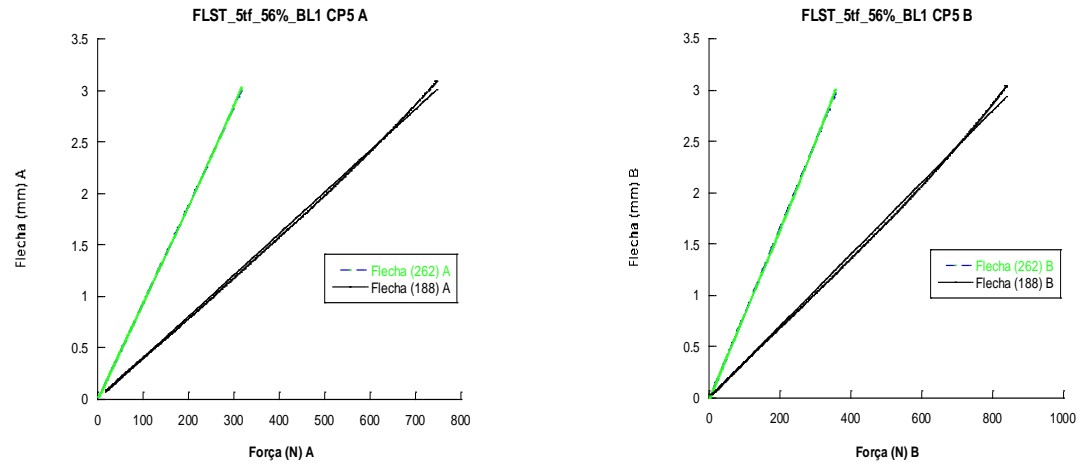


Figura A.34 – BL1 CP6, Posições A e B.

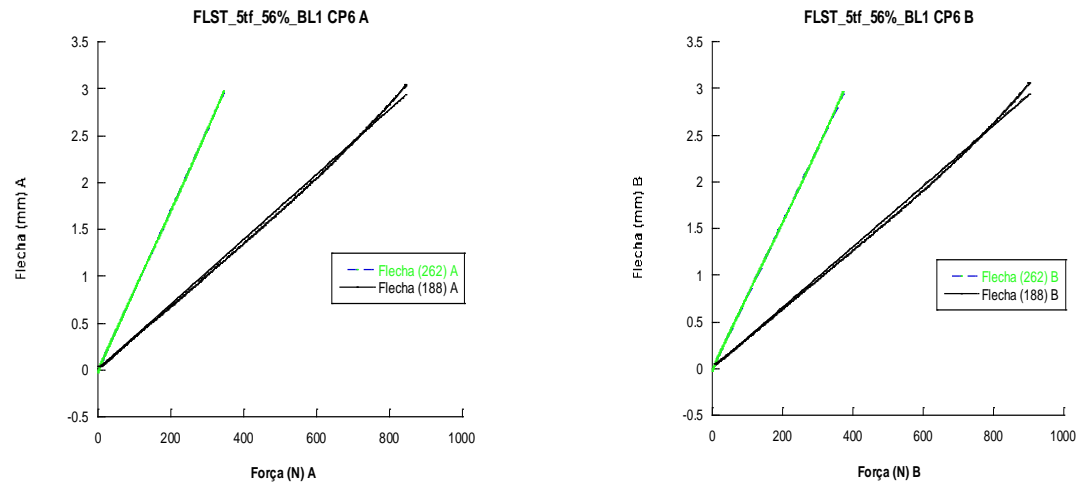


Figura A.35 – BL2 CP7, Posições A e B.

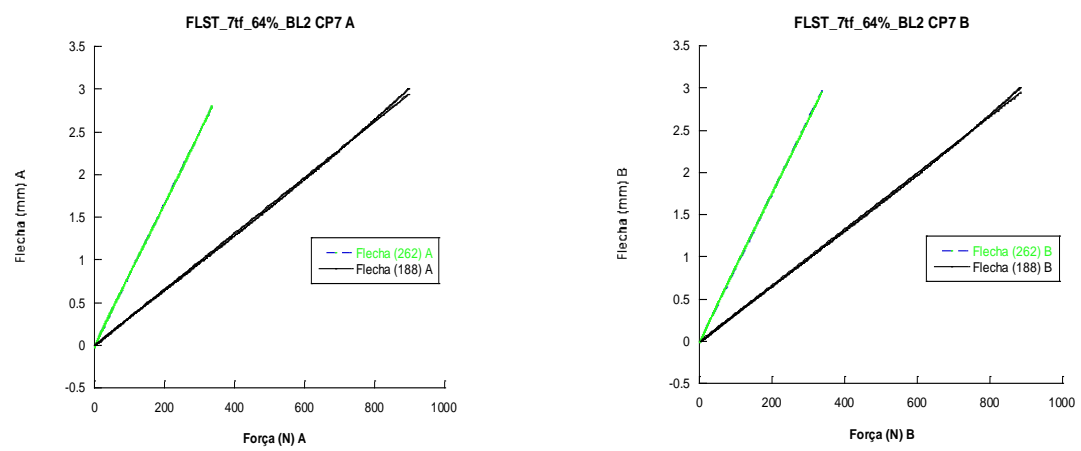


Figura A.36 – BL2 CP8, Posições A e B.

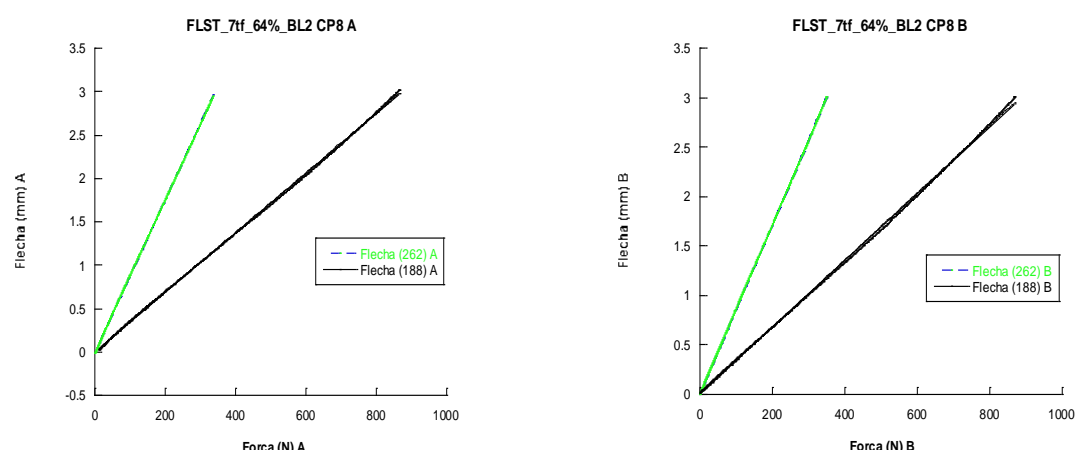


Figura A.37 – BL2 CP9, Posições A e B.

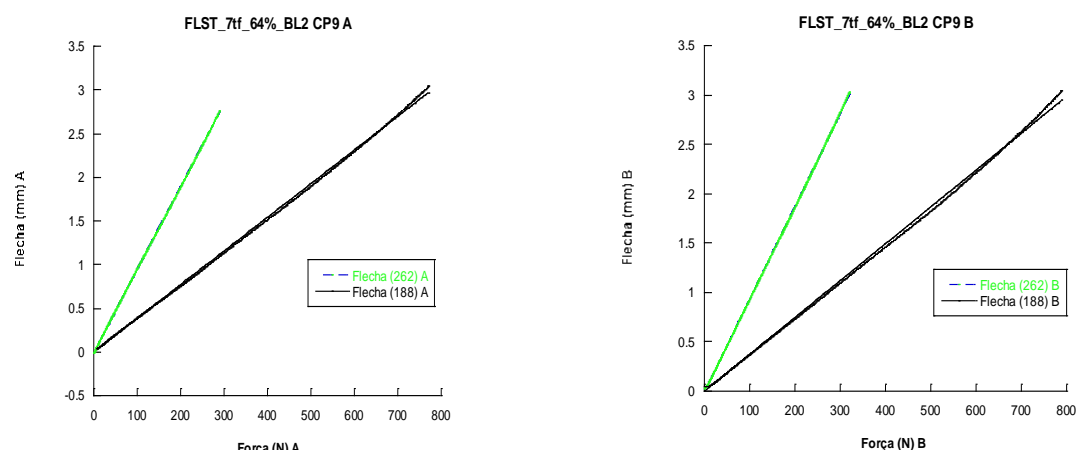


Figura A.38 – BL2 CP10, Posições A e B.

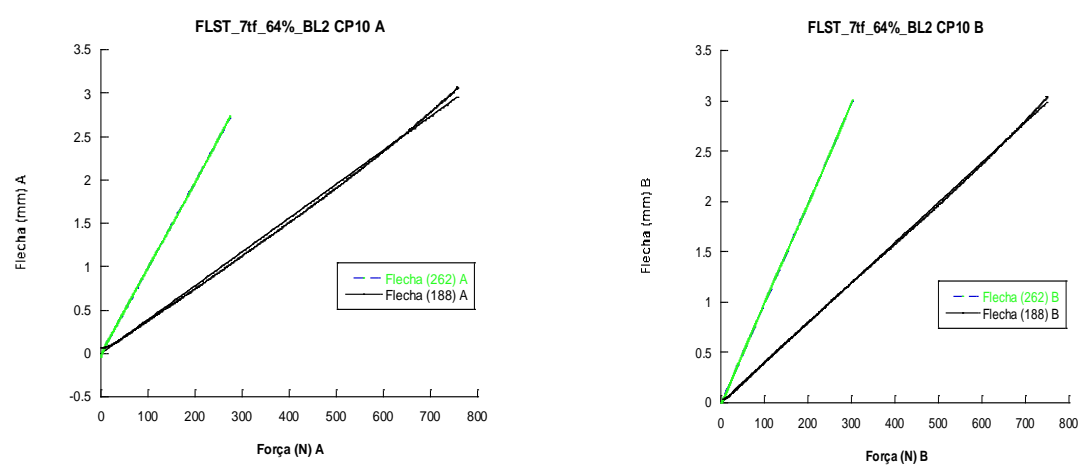


Figura A.39 – BL2 CP11, Posições A e B.

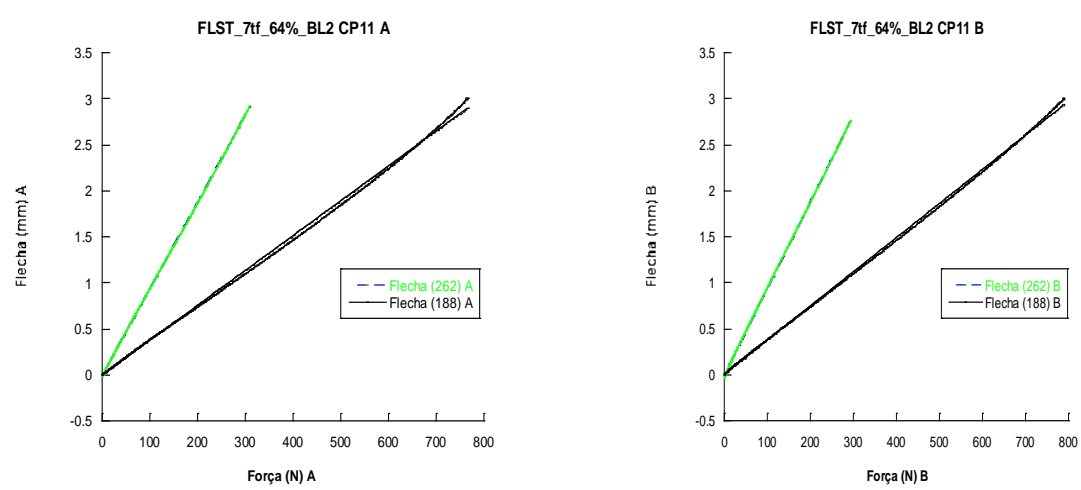


Figura A.40 – BL2 CP12, Posições A e B.

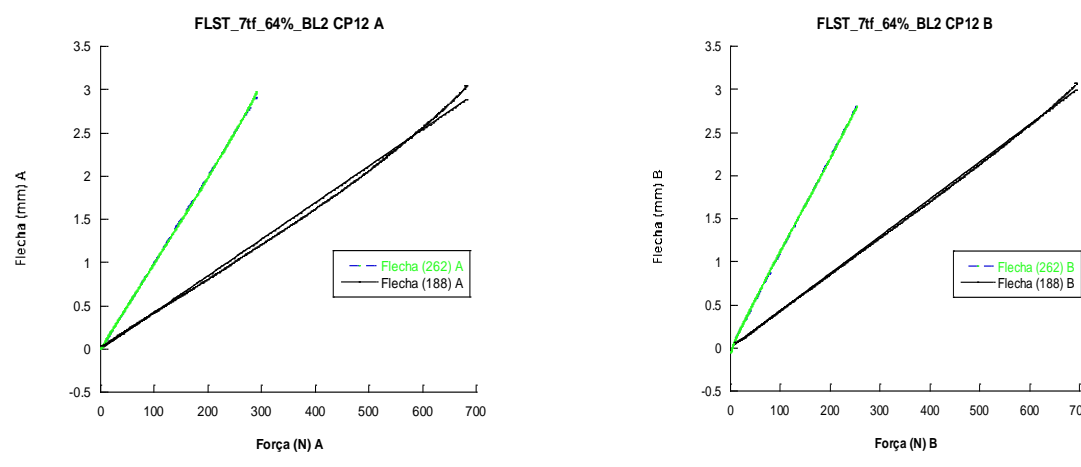


Figura A.41 – BL3 CP13, Posições A e B.

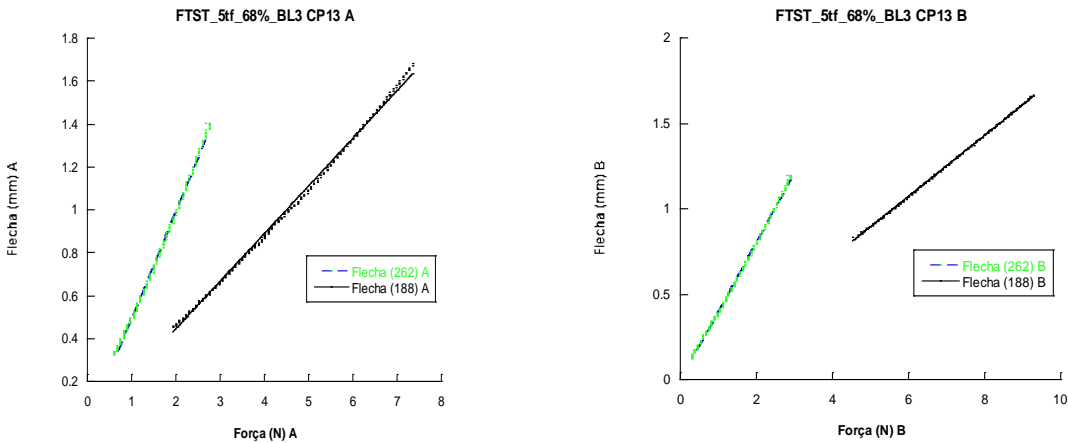


Figura A.42 – BL3 CP14, Posições A e B.

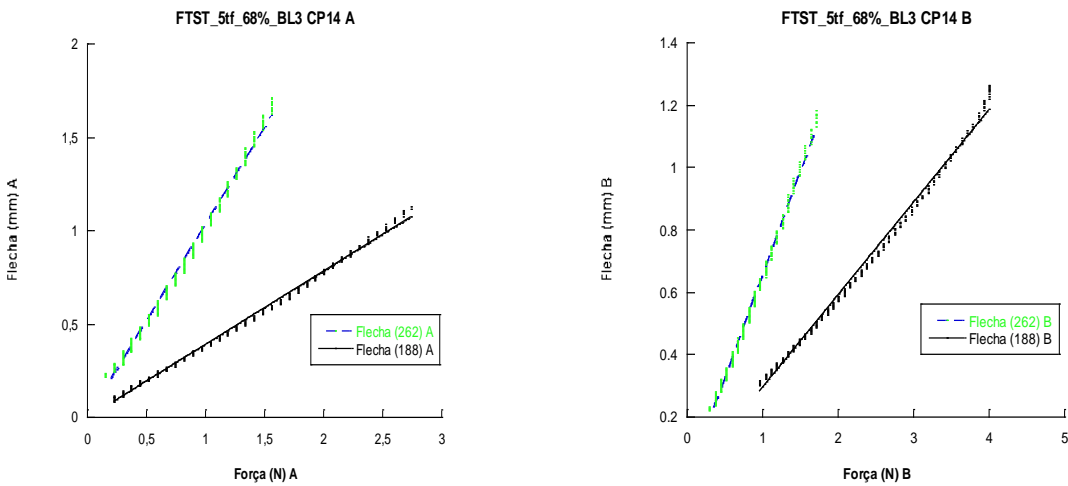


Figura A.43 – BL3 CP15, Posições A e B.

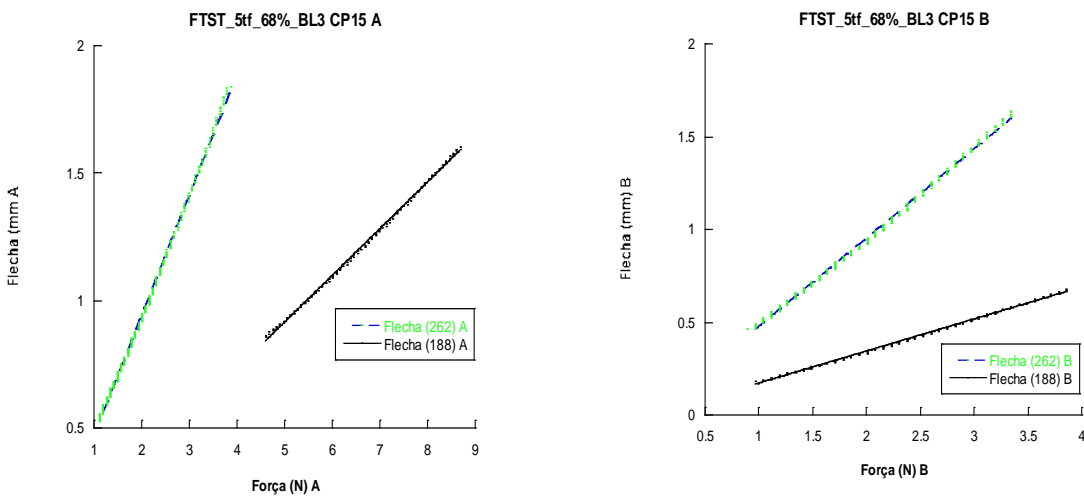


Figura A.44 – BL4 CP16, Posições A e B.

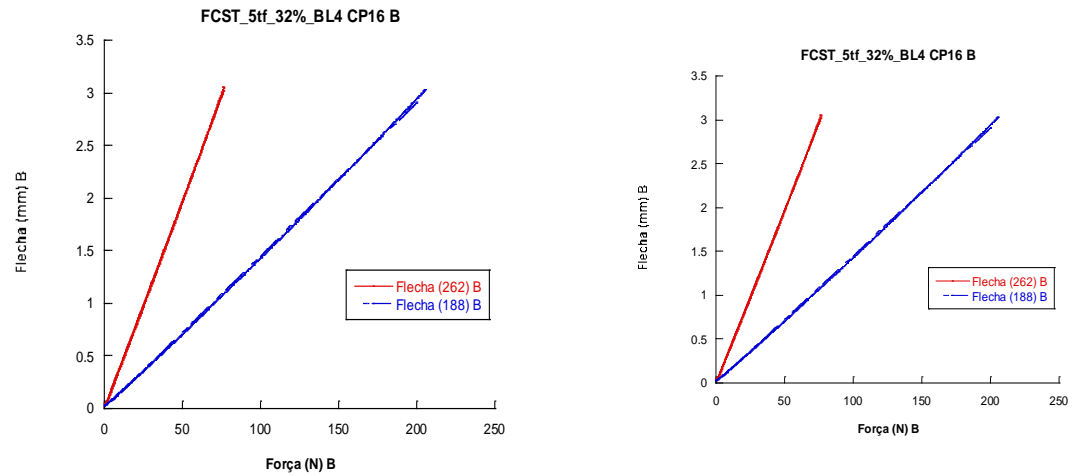


Figura A.45 – BL4 CP17, Posições A e B.

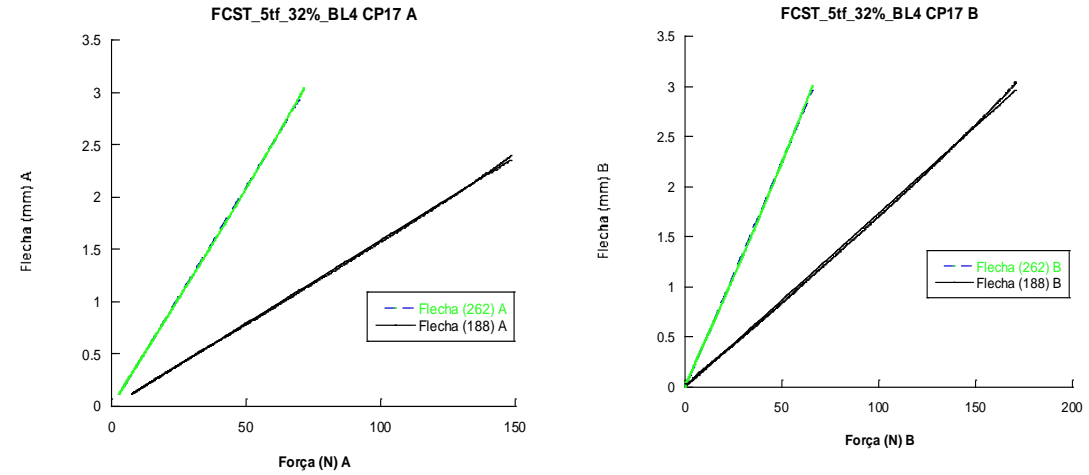


Figura A.46 – BL4 CP18, Posições A e B.

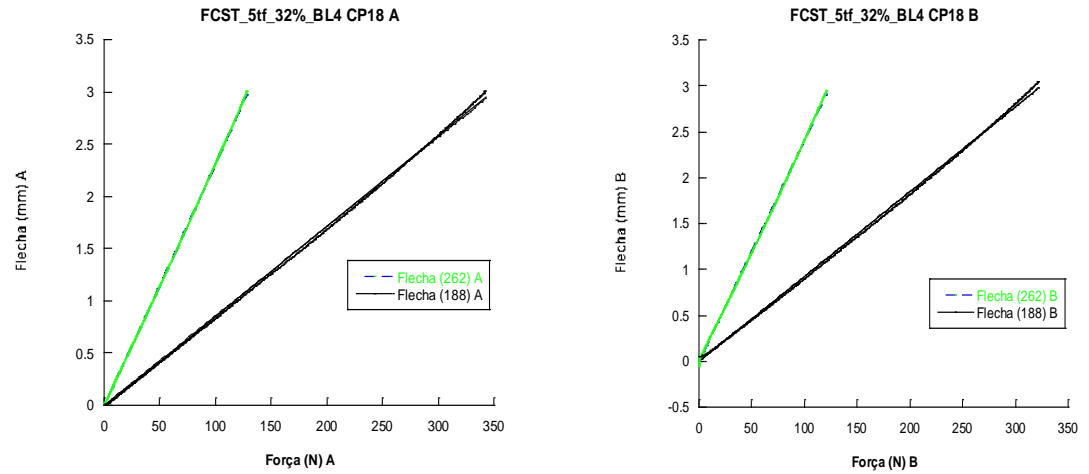


Figura A.47 – BL4 CP19, Posições A e B.

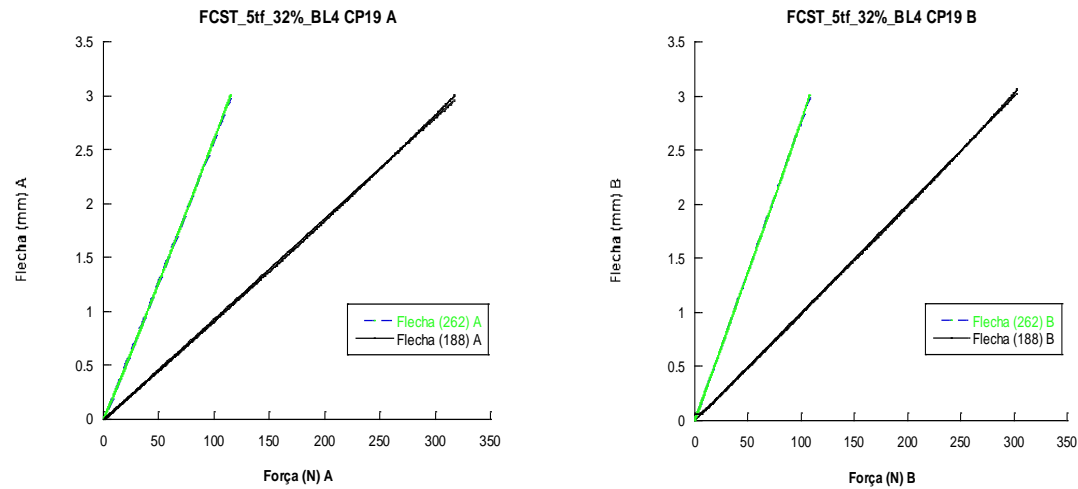


Figura A.48 – BL4 CP20, Posições A e B.

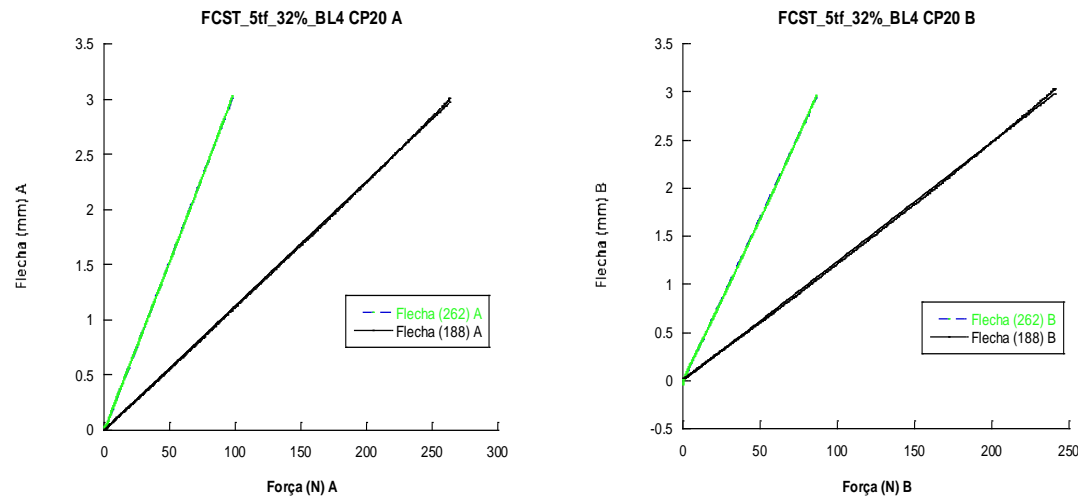
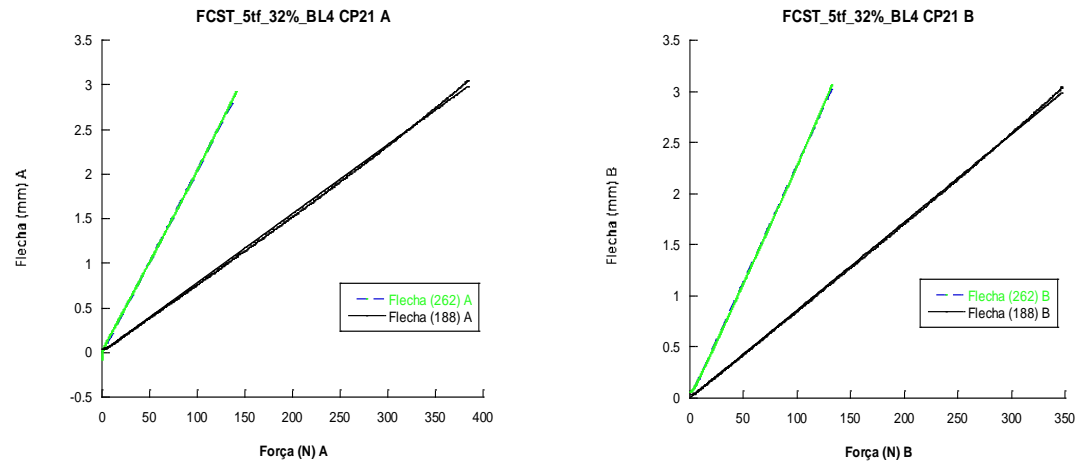


Figura A.49 – BL4 CP21, Posições A e B.



ANEXOS

ANEXO A - TABELAS DE VALORES MÉDIOS DE MADEIRAS DICOTILEDÔNEAS E CONÍFERAS, NATIVAS E DE REFLORESTAMENTO, EXTRAÍDAS DA NORMA ABNT NBR 7190: 1997.

Tabela A.18 – Valores médios de madeiras dicotiledôneas nativas e de reflorestamento.

Nome comum (dicotiledôneas)	Nome científico	$\rho_{ap}^{1)}$ (12%) kg/m ³	$f_{c0}^{2)}$ MPa	$f_{t0}^{3)}$ MPa	$f_{t90}^{4)}$ MPa	$F_v^{5)}$ MPa	$E_{c0}^{6)}$ MPa	$n^{7)}$ n
Angelim araroba	<i>Voltaireopsis araroba</i>	688	50,5	69,2	3,1	7,1	12 876	15
Angelim ferro	<i>Hymenolobium spp</i>	1 170	79,5	117,8	3,7	11,8	20 827	20
Angelim pedra	<i>Hymenolobium petraeum</i>	694	59,8	75,5	3,5	8,8	12 192	39
Angelim pedra verdadeiro	<i>Dinizia excelsa</i>	1 170	76,7	104,9	4,8	11,3	16 694	12
Branquilha	<i>Termilalia spp</i>	803	48,1	87,9	3,2	9,8	13 481	10
Cafarana	<i>Andira spp</i>	677	59,1	79,7	3,0	5,9	14 098	11
Canafistula	<i>Cassia ferruginea</i>	871	52,0	84,9	6,2	11,1	14 613	12
Casca grossa	<i>Vochysia spp</i>	801	56,0	120,2	4,1	8,2	16 224	31
Castelo	<i>Gossypiospermum praecox</i>	759	54,8	99,5	7,5	12,8	11 105	12
Cedro amargo	<i>Cedrella odorata</i>	504	39,0	58,1	3,0	6,1	9 839	21
Cedro doce	<i>Cedrella spp</i>	500	31,5	71,4	3,0	5,6	8 058	10
Champagne	<i>Dipteryis odorata</i>	1 090	93,2	133,5	2,9	10,7	23 002	12
Cupiúba	<i>Goupia glabra</i>	838	54,4	62,1	3,3	10,4	13 627	33
Catiúba	<i>Qualea paraensis</i>	1 221	83,8	86,2	3,3	11,1	19 426	13
E. Alba	<i>Eucalyptus Alba</i>	705	47,3	69,4	4,6	9,5	13 409	24
E. Camaldulensis	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	899	48,0	78,1	4,6	9,0	13 286	18
E. Citriodora	<i>Eucalyptus citriodora</i>	999	62,0	123,6	3,9	10,7	18 421	68
E. Cloeziana	<i>Eucalyptus cloeziana</i>	822	51,8	90,8	4,0	10,5	13 963	21
E. Dunnii	<i>Eucalyptus dunnii</i>	690	48,9	139,2	6,9	9,8	18 029	15
E. Grandis	<i>Eucalyptus grandis</i>	640	40,3	70,2	2,6	7,0	12 813	103
E. Maculata	<i>Eucalyptus maculata</i>	913	63,5	115,6	4,1	10,6	10 099	53
E. Maidene	<i>Eucalyptus maidene</i>	924	48,3	83,7	4,8	10,3	14,431	10
E. Paniculata	<i>Eucalyptus paniculata</i>	1 087	72,2	147,4	4,7	12,4	19 881	29
E. Propinqua	<i>Eucalyptus propinqua</i>	952	51,6	89,1	4,7	9,7	15 561	63
E. Punctata	<i>Eucalyptus punctata</i>	948	78,5	125,6	6,0	12,9	19 360	70

¹⁾ $\rho_{ap(12\%)}$ é a massa específica aparente a 12% de umidade.

²⁾ f_{c0} é a resistência à compressão paralela às fibras.

³⁾ f_{t0} é a resistência à tração paralela às fibras.

⁴⁾ f_{t90} é a resistência à tração normal às fibras.

⁵⁾ F_v é a resistência ao cisalhamento.

⁶⁾ E_{c0} é o módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralelo às fibras.

⁷⁾ n é o número de corpos de prova ensaiados.

NOTAS

1 As propriedades de resistência e rigidez apresentadas nesta tabela foram determinadas pelos ensaios realizados no laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo.

2 Coeficiente de variação para resistências a solicitações normais: $\delta=18\%$.

3 Coeficiente de variação para resistências a solicitações tangenciais: $\delta=28\%$.

Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997).

Tabela A.19 – Valores médios de madeiras dicotiledôneas nativas e de reflorestamento.

Nome comum (dicotiledôneas)	Nome científico	$\rho_{ap}^{1)}$ kg/m ³	$f_{c0}^{2)}$ MPa	$f_{t0}^{3)}$ MPa	$f_{t90}^{4)}$ MPa	$F_v^{5)}$ MPa	$E_{c0}^{6)}$ MPa	$n^{7)}$ n
E. Saligna	<i>Eucalyptus saligna</i>	731	46,8	95,5	4,0	8,2	14 933	67
E. Tereticomis	<i>Eucalyptus tereticomis</i>	899	57,7	115,9	4,6	9,7	17 198	29
E. Triantha	<i>Eucalyptus triantha</i>	755	53,9	100,9	2,7	9,2	14 617	08
E. Umbra	<i>Eucalyptus Umbra</i>	889	42,7	90,4	3,0	9,4	14 577	08
E. Urophylla	<i>Eucalyptus urophylla</i>	739	46,0	85,1	4,1	8,3	13 166	86
Garapa Roraima	<i>Apuleia leiocarpa</i>	892	78,4	108,0	6,9	11,9	18 359	12
Guaíçara	<i>Luetzelburgia spp</i>	825	71,4	115,6	4,2	12,5	14 624	11
Guaruçua	<i>Peltophorum vogelianum</i>	919	62,4	70,9	5,5	15,5	17 212	13
Ipê	<i>Tebebuia serratifolia</i>	1 068	76,0	96,8	3,1	13,1	18 011	22
Jatobá	<i>Hymenaea spp</i>	1 074	93,3	157,5	3,2	15,7	23 607	20
Louro Preto	<i>Ocotea spp</i>	684	56,5	111,9	3,3	9,0	14 185	24
Maçaranduba	<i>Manilkara spp</i>	1 143	82,9	138,5	5,4	14,9	22 733	12
Mandioqueira	<i>Qualea spp</i>	856	71,4	89,1	2,7	10,6	18 971	16
Oiticica Amarela	<i>Clarisia racemosa</i>	756	69,9	82,5	3,9	10,6	14 719	12
Quarubarana	<i>Erismia uncinatum</i>	544	37,8	58,1	2,6	5,8	9 057	11
Sucupira	<i>Diploptropis spp</i>	1 106	95,2	123,4	3,4	11,8	21 724	12
Tatajuba	<i>Bagassa guianensis</i>	940	79,5	78,8	3,9	12,2	19 583	10

¹⁾ $\rho_{ap(12\%)}$ é a massa específica aparente a 12% de umidade.

²⁾ f_{c0} é a resistência à compressão paralela às fibras.

³⁾ f_{t0} é a resistência à tração paralela às fibras.

⁴⁾ f_{t90} é a resistência à tração normal às fibras.

⁵⁾ f_v é a resistência ao cisalhamento.

⁶⁾ E_{c0} é o módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralelo às fibras.

⁷⁾ n é o número de corpos de prova ensaiados.

NOTAS

1 As propriedades de resistência e rigidez apresentadas nesta tabela foram determinadas pelos ensaios realizados no laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo.

2 Coeficiente de variação para resistências a solicitações normais: $\delta=18\%$.

3 Coeficiente de variação para resistências a solicitações tangenciais: $\delta=28\%$.

Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997).

Tabela A.20 – Valores médios de madeiras coníferas nativas e de reflorestamento.

Nome comum (coníferas)	Nome científico	ρ_{ap} (12%) ¹⁾ kg/m ³	f_{c0} ²⁾ MPa	f_{t0} ³⁾ MPa	f_{t90} ⁴⁾ MPa	F_v ⁵⁾ MPa	E_{c0} ⁶⁾ MPa	n ⁷⁾
Pinho do Paraná	<i>Araucaria angustifolia</i>	580	40,9	93,1	1,6	8,8	15 225	15
Pinus Caribea	<i>Pinus caribea</i> var. <i>caribea</i>	579	35,4	64,8	3,2	7,8	8 431	28
Pinus Bahamensis	<i>Pinus caribea</i> var. <i>bahamensis</i>	537	32,6	52,7	2,4	6,8	7 110	32
Pinus Hondurensis	<i>Pinus caribea</i> var. <i>hondurensis</i>	535	42,3	50,3	2,6	7,8	9 868	99
Pinus Eliotti	<i>Pinus eliottii</i> var. <i>eliotii</i>	560	40,4	66,0	2,5	7,4	11 889	21
Pinus Oocarpa	<i>Pinus oocarpa</i> shiede	538	43,6	60,9	2,5	8,0	10 904	71
Pinus Taeda	<i>Pinus taeda</i> L.	645	44,4	82,8	2,8	7,7	13 304	15

¹⁾ $\rho_{ap(12\%)}$ é a massa específica aparente a 12% de umidade.

²⁾ f_{c0} é a resistência à compressão paralela às fibras.

³⁾ f_{t0} é a resistência à tração paralela às fibras.

⁴⁾ f_{t90} é a resistência à tração normal às fibras.

⁵⁾ F_v é a resistência ao cisalhamento.

⁶⁾ E_{c0} é o módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralelo às fibras.

⁷⁾ n é o número de corpos de prova ensaiados.

NOTAS

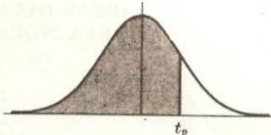
1 As propriedades de resistência e rigidez apresentadas nesta tabela foram determinadas pelos ensaios realizados no laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo.

2 Coeficiente de variação para resistências a solicitações normais: $\delta=18\%$.

3 Coeficiente de variação para resistências a solicitações tangenciais: $\delta=28\%$.

Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997).

ANEXO B - TABELA DE VALORES DOS PERCENTIS (t_p) PARA DISTRIBUIÇÃO t DE STUDENT (EXTRAÍDA DE “MANUAL DE FÓRMULAS E TABELAS MATEMÁTICAS”; SPIEGEL M. R.; 1974; EDITORA MC GRAW-HILL DO BRASIL, LTDA).

TABELA 48	VALORES PERCENTIS (t_p) PARA DISTRIBUIÇÃO DE STUDENT t com n graus de liberdade (área sombreada = p)	
----------------------------	--	--

n	$t_{0,995}$	$t_{0,99}$	$t_{0,975}$	$t_{0,95}$	$t_{0,90}$	$t_{0,80}$	$t_{0,75}$	$t_{0,70}$	$t_{0,60}$	$t_{0,55}$
1	63,66	31,82	12,71	6,31	3,08	1,376	1,000	0,727	0,325	0,158
2	9,92	6,96	4,30	2,92	1,89	1,061	0,816	0,617	0,289	0,142
3	5,84	4,54	3,18	2,35	1,64	0,978	0,765	0,584	0,277	0,137
4	4,60	3,75	2,78	2,13	1,53	0,941	0,741	0,569	0,271	0,134
5	4,03	3,36	2,57	2,02	1,48	0,920	0,727	0,559	0,267	0,132
6	3,71	3,14	2,45	1,94	1,44	0,906	0,718	0,553	0,265	0,131
7	3,50	3,00	2,36	1,90	1,42	0,896	0,711	0,549	0,263	0,130
8	3,36	2,90	2,31	1,86	1,40	0,889	0,706	0,546	0,262	0,130
9	3,25	2,82	2,26	1,83	1,38	0,883	0,703	0,543	0,261	0,129
10	3,17	2,76	2,23	1,81	1,37	0,879	0,700	0,542	0,260	0,129
11	3,11	2,72	2,20	1,80	1,36	0,876	0,697	0,540	0,260	0,129
12	3,06	2,68	2,18	1,78	1,36	0,873	0,695	0,539	0,259	0,128
13	3,01	2,65	2,16	1,77	1,35	0,870	0,694	0,538	0,259	0,128
14	2,98	2,62	2,14	1,76	1,34	0,868	0,692	0,537	0,258	0,128
15	2,95	2,60	2,13	1,75	1,34	0,866	0,691	0,536	0,258	0,128
16	2,92	2,58	2,12	1,75	1,34	0,865	0,690	0,535	0,258	0,128
17	2,90	2,57	2,11	1,74	1,33	0,863	0,689	0,534	0,257	0,128
18	2,88	2,55	2,10	1,73	1,33	0,862	0,688	0,534	0,257	0,127
19	2,86	2,54	2,09	1,73	1,33	0,861	0,688	0,533	0,257	0,127
20	2,84	2,53	2,09	1,72	1,32	0,860	0,687	0,533	0,257	0,127
21	2,83	2,52	2,08	1,72	1,32	0,859	0,686	0,532	0,257	0,127
22	2,82	2,51	2,07	1,72	1,32	0,858	0,686	0,532	0,256	0,127
23	2,81	2,50	2,07	1,71	1,32	0,858	0,685	0,532	0,256	0,127
24	2,80	2,49	2,06	1,71	1,32	0,857	0,685	0,531	0,256	0,127
25	2,79	2,48	2,06	1,71	1,32	0,856	0,684	0,531	0,256	0,127
26	2,78	2,48	2,06	1,71	1,32	0,856	0,684	0,531	0,256	0,127
27	2,77	2,47	2,05	1,70	1,31	0,855	0,684	0,531	0,256	0,127
28	2,76	2,47	2,05	1,70	1,31	0,855	0,683	0,530	0,256	0,127
29	2,76	2,46	2,04	1,70	1,31	0,854	0,683	0,530	0,256	0,127
30	2,75	2,46	2,04	1,70	1,31	0,854	0,683	0,530	0,256	0,127
40	2,70	2,42	2,02	1,68	1,30	0,851	0,681	0,529	0,255	0,126
60	2,66	2,39	2,00	1,67	1,30	0,848	0,679	0,527	0,254	0,126
120	2,62	2,36	1,98	1,66	1,29	0,845	0,677	0,526	0,254	0,126
∞	2,58	2,33	1,96	1,645	1,28	0,842	0,674	0,524	0,253	0,126

Fonte: R. A. Fisher e F. Yates, *Statistical Tables for Biological, Agricultural and Medical Research* (6.ª edição, 1963), Table III, Oliver e Boyd Ltd., Edinburgh, por permissão dos autores e editores.

Fonte: (Spiegel, 1974.)